N. Wiener y J. P. Schadé

Sobre modelos de los nervios el cerebro y la memoria

ESTRUCTURA Y FUNCION

EDITORIAL TECNOS - MADRID

SOBRE MODELOS DE LOS NERVIOS, EL CEREBRO Y LA MEMORIA

En este volumen se recogen las comunicaciones del simposio sobre cibernética relativa al sistema nervioso, habido en la Real Academia Holandesa de Ciencias, en abril de 1962. Se trata de un simposio multidisciplinar, organizado alrededor de tres cuestiones principales: los modelos de los nervios, del cerebro y de la memoria. Este carácter multidisciplinar ha quedado subrayado al participar en él neurólogos, psiquiatras, biólogos, ingenieros, matemáticos y físicos, ocupados en algunos de los muchos problemas y teorías menos conocidas de este campo de la biocibernética. Si bien no se han abarcado en el simposio —como tampoco en el libro— todos los aspectos de esta nueva ciencia, sí se han puesto de relieve aquellos temas de la biocibernética de tanto interés como de difícil penetración.

Entre los autores, aparte de Wiener y Schadé, cabe mencionar los nombres de Ten Hoopen, Verveen, Cowan, Latour, George Pask, Napalkov, etc., entre otros muchos de no menor prestigio y renombre que los expresados.

SOBRE MODELOS DE LOS NERVIOS EL CEREBRO Y LA MEMORIA

ESTRUCTURA Y FUNCION
EL PORVENIR ACTUAL DE LA CIENCIA

COLABORADORES

W. R. ASHBY:
University of Illinois, Urbana, Ill. (EE. UU.).

V. BRAITENBERG:
Centro di Cibernetica del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Instituto di Fisica Teorica, Università di Napoli (Italia).

J. H. CLARK:
Burden Neurological Institute, Bristol (Gran Bretaña).

J. D. COWAN:
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. (EE. UU.).

H. FRANK:
Institut für Nachrichtenverarbeitung und Nachrichtenübertragung der Technischen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe (Alemania).

F. H. GEORGE:
Department of Psychology, University of Bristol, Bristol (Gran Bretaña).

E. HUANT:
9 Avenue Niel, Paris (Francia).

P. L. LATOUR:
Institute for Perception Physiology, Soesterberg (Holanda).

P. MÜLLER:
Institut für Nachrichtenverarbeitung und Nachrichtenübertragung der Technischen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe (Alemania).

A. V. NAPALKOV:
Universidad Estatal de Moscú, Moscú (U. R. S. S.).

P. NAYRAC:
Clinique Neurologique et Psychiatrique de l'Université de Lille, Lille (Francia).

A. NIGRO:
Via Garibaldi, Messina (Italia).

G. PASK:
System Research Ltd., Richmond, Surrey (Gran Bretaña).

N. RASHEVSKY:
Committee on Mathematical Biology, University of Chicago, Chicago, Ill. (EE. UU).

J. L. SAUVAN:
43, Boulevard Albert-1er, Antibes (Francia).

J. P. SCHADÉ:
Instituto Central de Investigaciones Cerebrales, Amsterdam (Holanda).

N. STANOULOV:
Ul. k. Peitchinovitch, Sofia (Bulgaria).

M. TEN HOOPEN:
Instituto de física médica TNO, Consejo de Investigaciones de la Sanidad Nacional, Utrecht (Holanda).

A. A. VERVEEN:
Instituto Central de Investigaciones Cerebrales, Amsterdam (Holanda).

H. VON FOERSTER:
University of Illinois, Urbana, Ill. (EE. UU.).

C. C. WALKER:
University of Illinois, Urbana, Ill. (EE. UU.).

O. D. WELLS:
Artorga Research Group, Beaulieu, Hants (Gran Bretaña).

N. WIENER:
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. (EE. UU.).

J. ZEMAN:
Instituto de Filosofía, Academia checoslovaca de Ciencias, Praga (Checoslovaquia).

G. W. ZOPF, JR.:
University of Illinois, Urbana, Ill. (EE. UU.).

SOBRE MODELOS DE LOS NERVIOS, EL CEREBRO Y LA MEMORIA

Introducción y preparación por

N. Wiener y J. P. Schadé

EDITORIAL TECNOS

MADRID

Los derechos para la versión castellana de la obra
NERVE, BRAIN AND MEMORY MODELS
publicada por Elsevier Publishing Company, de Amsterdam
son propiedad de EDITORIAL TECNOS, S. A.

Traducción de
VICTOR SANCHEZ DE ZAVALA

© EDITORIAL TECNOS, S. A.—1969
O'Donnell, 27.—Tel. 2262923.—Madrid (9)
Dep. legal: M. 24.771 - 1969

Printed in Spain.—Impreso en España por ALDUS, S. A. - Castelló, 120. MADRID-6

Sumario

Introducción a la neurocibernética.
N. Wiener y J. P. Schadé (Cambridge, Mass., y Amsterdam) 9

Experimentos con un modelo de nervio sobre fluctuaciones de la excitabilidad.
M. Ten Hoopen y A. A. Verveen (Amsterdam) 19

El ataque al problema de la integración biológica con los métodos del ingeniero.
J. D. Cowan (Cambridge, Mass.) 37

La neurona como unidad síncrona.
P. L. Latour (Soesterberg, Holanda) 49

Los autómatas finitos y el sistema nervioso.
F. H. George (Bristol, Gran Bretaña) 59

Interpretación del mecanismo de reflejos condicionados que inhibe la actividad de un órgano en funcionamiento.
A. Nigro (Messina, Italia) 81

Los procesos tramitadores de la información en el cerebro.
A. V. Napalkov (Moscú) 89

La información y el cerebro.
J. Zeman (Praga) 103

La psicología informatoria y la telecomunicación.
H. Frank (Karlsruhe, Alemania) 115

Clases y propiedades de las matrices de aprendizaje.
P. Müller (Karlsruhe, Alemania) 137

La homeóstasis sensorial.
G. W. Zopf Jr. (Urbana, Ill.) 157

Información sensorial e información conceptual en la actividad bioeléctrica del cerebro.
E. Huant (París) 167

Modelo cibernético de memoria activa con capacidad de recepción ilimitada.
J. L. Sauvan (Antibes, Francia) 191

Notas preliminares sobre un esquema funcional del pensamiento humano.
N. Stanoulov (Sofía) 205

Histología, histonomía, histo-lógica.
V. Braitenberg (Nápoles, Italia) 213

Estudio de la cibernética del comportamiento de aprendizaje.
G. Pask (*Richmond, Surrey, Gran Bretaña*) 233

El obstáculo de la falta de linealidad en neurología.
P. Nayrac (*Lille, Francia*) 285

Las máquinas adaptativas en psiquiatría.
J. H. Clark (*Bristol, Gran Bretaña*) 297

La inestabilidad esencial de los sistemas con umbral y algunas posibles aplicaciones a la psiquiatría.
W. R. Ashby, H. von Foerster y C. C. Walker (*Urbana, Ill.*) 313

Teoría matemática de los efectos de la estructura celular y de los procesos de la difusión en la homeóstasis y la cinética del sistema endocrino, con referencia especial a ciertas psicosis periódicas.
N. Rashevski (*Chicago, Ill.*) 325

La falta de importancia del «sistema nervioso».
O. D. Wells (*Hants, Gran Bretaña*) 341

Epílogo.
N. Wiener (*Cambridge, Mass.*) 351

Indice de autores 357

Indice de materias 361

Introducción a la neurocibernética

Por N. WIENER y J. P. SCHADÉ

La cibernética es el estudio de la comunicación y el regimiento * en las máquinas y en los organismos vivos; la biocibernética es la parte de tal estudio en la que se hacen destacar estos últimos, y en ella se encuentran dos campos que es preciso distinguir (aun cuando la distinción no pueda trazarse de modo tajante): la neurocibernética y la cibernética médica. La primera trata de las vías que sigue la actividad a través de los órganos de los sentidos, las neuronas y los efectores, debido al hecho de que la cibernética se ocupa primariamente de construir modelos y teorías; y sus símbolos y aparatos guardan un estrecho parecido con los elementos del sistema nervioso y de los órganos sensoriales. En la cibernética médica, en cambio, se atiende sobre todo a la homeóstasis o mantenimiento de la constancia del medio interno. No hay una distinción neta entre estos dos campos, ya que no cabe duda de que los cambios del nivel de equilibrio de nuestros factores internos van unidos a cambios de las reacciones externas: por ejemplo, estas últimas dependen de mensajeros químicos tales como las hormonas, que pertenecen a nuestro medio interno; e incluso el paso de mensajes —mucho más preciso— que tiene lugar mediante la transmisión nerviosa posee importantes factores químicos y hasta (posiblemente) hormonales.

La propagación de un potencial de acción a todo lo largo de un nervio es un proceso electroquímico, y la transmisión de un mensaje a través de una sinapsis constituye probablemente el mismo proceso, si bien mucho más complicado; en ambos casos, lo que efectúa la comunicación entre los nervios son modificaciones de la situación química general, de modo que no podemos señalar una separación absolutamente neta entre los dos campos de la biocibernética. Con todo, no puede uno acercarse a un tema

---

* Empleamos este término clásico (recuérdese el *Regimiento de príncipes*, de Guevara) y el verbo «regir» para trasladar la palabra inglesa *control* en el sentido que apunta directamente a la conducción *autónoma* de un proceso, sistema o aparato (separándolo de otras acepciones, que convendría traducir por «mando» y «mandar», «dominación» y «dominar», «vigía» y «vigilar», etc.). Podría haberse empleado «reacción», con derivación que parece más viva hoy en castellano, pero esta voz alude acaso más a un acontecimiento que a una actividad, en tanto que el término que hemos adoptado —siguiendo una sugerencia del profesor Tierno Galván— destaca ésta ante todo, como conviene en nuestro caso. *(N. del T.)*

tan complicado como el de esta ciencia con la pretensión de tratarlo globalmente: es menester fragmentarlo; dicho de otro modo, el análisis lleva consigo necesariamente un elemento falsificador. Es imposible conseguir ningún progreso de importancia sin dividir la biocibernética en neurocibernética y lo que hemos llamado cibernética médica.

El instrumento de que nos hemos de valer para el estudio de cualquier sistema complicado es el de medir ciertas cantidades ligadas a él y estudiar sus relaciones matemáticas. Los puntos de vista antiguos de la física consideraban posible especificar en forma completa todas las relaciones cuantitativas de un sistema total; el enfoque moderno sostiene que no cabe describir completamente algunas de ellas, cuya presentación sólo podrá hacerse en forma estadística —la cual no nos dice qué es lo que sucede siempre, sino (dentro de una precisión determinada) qué es lo que suele suceder—. Para el estudio de la biocibernética carece de importancia cuál de estas dos actitudes se adopte, ya que la especificación completa de todas las cantidades es algo que excede con mucho nuestras posibilidades: la complejidad del cerebro es enorme y todo cuanto podemos medir es una parte mínima de lo que allí acontece; es preciso estimar el resto sobre una base estadística o prescindir de ello enteramente. Así pues, las matemáticas propias del sistema nervioso y de la cibernética tienen que ser estadísticas; y no sólo tal cosa, sino esencialmente no lineales.

En todo sistema lineal, cuando sumamos entradas sumamos salidas *, y cuando multiplicamos una entrada por una constante multiplicamos la salida por la misma constante. Los sistemas lineales parecen ser muy frecuentes (en la oscilación de un péndulo tenemos un sistema que podemos consilerar lineal cuando el ángulo es pequeño); pero como los sistemas estrictamente lineales casi no existen, es muy ventajoso ocuparse de los *aproximadamente* lineales. Ahora bien, la distinción entre estos últimos y los verdaderamente lineales es vital: en cualquier sistema estrictamente lineal no es posible interacción de grado alguno entre dos modos distintos de oscilación, sean éstos los que fueren, de suerte que es imposible un equilibrio general entre los modos de oscilación; en un sistema aproximadamente lineal puede producirse una transferencia de energía de un modo a otro, y existen ciertos estados del sistema en los que unos cambios muy lentos habrán de dar lugar a un equilibrio (lo cual está en relación muy estrecha con la teoría de Ehrenfest de la invariancia adiabática).

El reloj es un interesante sistema fuertemente no lineal. Solemos pensar en el reloj de péndola fijándonos exclusivamente en ésta; pero incluye también las pesas, el tren de engranajes y las agujas. Tenemos en este caso

---

* Téngase en cuenta, a lo largo de toda la obra, que *entrada* se toma en la acepción de «acción de un tipo especificado que se ejerce desde el exterior sobre un sistema o elemento», o en la de «vía de entrada» (en el sentido anterior de este último término); y *salida* se ha de entender en los sentidos correspondientes. (En este lugar se trata del primer sentido.) *(N. del T.)*

una entrada de flujo continuo y una carga de mismo tipo, y la péndola es la máquina que regula el tiempo; tiene que haber un paso de energía que medie entre la entrada y la salida; pero un paso tal entre piezas dotadas de frecuencia nula y las manecillas mandadas por la péndola entraña la falta de linealidad. En los fenómenos cibernéticos se encuentra este tipo tan general de no linealidad, de modo que hemos de tener mucho cuidado para no dar por supuesto que un sistema ha de ser verdaderamente lineal porque lo sea aproximadamente.

En el sistema nervioso, con sus umbrales, limitaciones de amplitud y conducción unidireccional, hallamos todas las formas de falta de linealidad que pueden encontrarse en los sistemas eléctricos dotados de limitadores de amplitud, rectificadores e interruptores: el aparato matemático del sistema nervioso y de la cibernética tiene que ser una teoría estadística no lineal.

La memoria implica almacenamiento de la información, y el condicionamiento involucra efectos a largo plazo; los cuales, de igual modo que el género de invariancia adiabática que tiene en cuenta Ehrenfest, implican intervalos temporales de gran duración y son fuertemente no lineales. Mas si intentamos construir un aparato eléctrico en el que desempeñen un papel la memoria y el condicionamiento, no intentaremos por eso hacer que todas las memorias y todos los condicionamientos sean del mismo tipo: poseemos un amplio repertorio de métodos, unos indicados para memorias a corto plazo y otros para las de largo plazo, pero que no están constreñidos a ningún modo particular de efectuar tal tarea; y esta multiplicidad de métodos es probablemente la razón de que nos sea tan difícil dar ningún paso que nos acerque de verdad al mecanismo de la memoria y del condicionamiento reales del sistema nervioso. En Nápoles, CAIANIELLO ha presentado (en 1960) una teoría de la red nerviosa que es a la vez estadística y no lineal; no cabe duda de que se está trabajando intensamente en estas direcciones, y parece que por aquí se ha de llegar pronto a una de las técnicas más fructíferas de la cibernética.

Esta no es sólo el estudio del regimiento y de la comunicación en el hombre y en la máquina, sino asimismo *entre* uno y otra; sin embargo, hace algún tiempo que se ha formado cierta actitud —que encontramos, en especial, en algunos círculos de ingenieros y técnicos— opuesta a esta relación: actitud que entraña la comparación (con desventaja para los humanos) entre lo que es capaz de hacer el hombre y lo que puede hacer la máquina. Ahora bien, en todo estudio comparativo de las capacidades humana y maquinal es menester percatarse de que el ser humano hace algunas cosas mucho mejor que la máquina y otras peor: el sistema humanal no es ni tan preciso ni tan rápido como una máquina computadora, y, por otra parte, ésta tiende a descomponerse en fragmentos sueltos, a menos que todos los detalles de su programación estén estrictamente determinados; el ser humano posee una enorme capacidad de conseguir resul-

tados aun cuando trabaje con una programación imperfecta: podemos llegar a muchísimas cosas partiendo de ideas vagas, en tanto que éstas carecen absolutamente de utilización posible para la mayoría de las máquinas existentes. Algunos ingenieros estiman la precisión y la velocidad mucho más que la suma de todas las cualidades humanas, preferencia por la máquina frente al hombre que hace patente un desprecio fundamental por el hombre y una repugnancia ante los valores humanos. Y, sin embargo, la relación entre la máquina y el hombre no debería concebirse en forma competitiva: la relación propia entre ambos no es la de competencia, sino que se halla en la puesta a punto de sistemas que se valgan tanto de las posibilidades humanales como de las mecánicas.

Una futura máquina de gran importancia es la máquina que aprende, capaz de modificarse en la programación en virtud de su propio éxito o fracaso. Existen ya algunas máquinas de esta índole (por ejemplo, para jugar al ajedrez), y pueden hacerse otras para otros muchos fines: se trata de máquinas que modifican su propia programación a base del éxito alcanzado. Mas con objeto de tener los dispositivos necesarios para realizar tal cosa es preciso saber qué quiere decir tener éxito; en una máquina destinada a jugar a un juego determinado, el éxito equivale a ganar la partida de acuerdo con ciertas reglas (a pesar de que el otro jugador forma parte del sistema condicionante, el juicio referente al éxito es muy objetivo); pero si, en cambio, lo que queremos es la construcción de una máquina de traducir, el éxito consiste en que la traducción sea realmente inteligible para el lector: en la determinación de lo que es el éxito de la máquina traductora tiene uno que valerse de un elemento humano (cabe concebir que llegue a darse una expresión puramente matemática de aquella propiedad, pero no será cosa fácil).

El sistema nervioso es increíblemente complejo, en especial si examinamos una gran masa, tal como la corteza cerebral. Contamos con diversas maneras de analizar la estructura fina de tal sistema, las cuales son en gran medida incompatibles entre sí en los detalles, pero que, con todo, es necesario reunir para conseguir una visión completa. Así, si lo que queremos es ver con claridad la neurona individual, uno de los mejores modos de hacerlo es usar el proceso de tinción de Golgi; pero con este método se tiñen sólo unas pocas neuronas de todas las que haya en la masa total, con lo que sigue en pie la cuestión acerca de si la selección es aleatoria o no (nos proporciona, sin embargo, una excelente ocasión para estudiar la organización del plexo dendrítico). Los clásicos métodos de Nissl tiñen los cuerpos celulares de las neuronas y de las células gliales, pero no revelan sino tramos muy cortos de las dendritas y los axones. En cuanto al microscopista electrónico, corta secciones tan delgadas que únicamente consigue tener pequeños jirones de neuronas y partes de prolongaciones celulares [*processes*], de modo que se pierden las relaciones que le interesan.

Se pueden emplear ciertas técnicas de tinción, tales como los métodos argénticos, en secciones mucho más gruesas, pero tenemos la desventaja de que así se ofrece a la vista un consternante montón de fibras estrechamente entrelazadas, que convierte en algo imposible el análisis de las conexiones existentes. Cabe superar algunas de estas dificultades usando una combinación de métodos histológicos distintos, como las técnicas de Nissl y de Golgi, o la microscopía electrónica y esta última tinción; mas, en general, queda siempre la tarea —extraordinariamente difícil— de adjuntar y componer fragmentos de saber empírico [*pieces of evidence*] logrados por vías muy diversas, lo cual explica, en parte, por qué es tan oscuro nuestro conocimiento acerca de las relaciones existentes entre la estructura y la función neurales.

La neurofisiología sólo puede analizar destruyendo parcialmente —si se inserta un microelectrodo en el sistema nervioso acaso podamos obtener datos de gran detalle local, pero también habremos causado un pequeño trauma—. La imposibilidad de estudiar el sistema nervioso sin producir un trauma es análoga a la que se encuentra en la teoría cuántica de estudiar un fenómeno físico sin perturbarlo: estas observaciones no constituyen un acto inocente y desligado.

Cuando se someten a debate la neurofisiología y la neuroanatomía hay un punto esencial que queda entonces enfocado: el de la diferencia existente entre las largas fibras mielinadas y los axones cortos, sin mielina. Aquéllas tienden a conducir cada impulso en forma de todo o nada, o sea mediante una serie de descargas en aguja [*spikes*], cada una de las cuales, si llega a producirse, tiene una forma fija; y, por otra parte, una descarga dada puede decaer mucho o no aparecer en absoluto en el teledendron, situado en el extremo de la fibra. Tal es, según admiten muchos, la manera normal de comportarse el sistema nervioso, incluidas las fibras cortas: así se dejan de lado los complicados efectos que tienen lugar entre cada neurona y las adyacentes a ella, pero se mantiene la antigua idea clásica de la descarga. Ahora bien, para que esta cadena de reacciones asuma una forma permanente se requiere cierto avance, tanto en tiempo como en distancia; ¿es posible que en las fibras cortas se tenga suficiente avance?; además, estas fibras no poseen una sección uniforme, y la velocidad correspondiente varía. Francamente, es muy dudoso que el principio de todo o nada sea aplicable en absoluto a las fibras muy cortas de la corteza.

He dicho ya que el neurofisiólogo y el neuroanatomista tienen que causar un trauma y una destrucción para ser capaces de ver; se trata, sin embargo, de un tipo particular de destrucción que es pertinente para sus problemas. Hay otras formas de análisis que son necesarias para el cibernetista: así el análisis del comportamiento. En éste se destruye también, y, en realidad, de un modo enteramente literal: el condicionamiento puede tullir completamente los animales sometidos a él; y asimismo se pro-

duce la destrucción intelectual consistente en tratar el reflejo condicionado como un todo autónomo, sin tomar en consideración la totalidad del pasado del animal: también aquí tenemos, bajo otra forma, la falsificación que es necesaria para el análisis.

No podemos decir qué forma es acertada y cuál equivocada; es preciso reunir los métodos de los estudiosos del comportamiento, de los neuroanatomistas y de los fisiólogos para acercarse al punto de vista cibernético a gran escala. Esta multiplicidad de modos de analizar convierte en algo muy complicado la preparación propia del cibernetista: necesita las dotes del neurofisiólogo, del neuroanatomista, del matemático, el físico, el estudioso del comportamiento y el psicólogo de los sentidos. Y un punto de importancia es que no podemos esperar que una serie de personas de estas diversas disciplinas den origen a una labor cibernética por el mero hecho de agruparse: cada una de ellas tiene que entender el lenguaje, los métodos y los pensamientos de los demás.

En este volumen se encuentran las comunicaciones del simposio sobre cibernética del sistema nervioso habido en la Real Academia Holandesa de Ciencias en abril de 1962. Se ha tratado de un simposio multidisciplinar, que hemos intentado organizar alrededor de tres cuestiones principales, los modelos de los nervios, del cerebro y de la memoria, y cuyo carácter multidisciplinar se ha subrayado al invitar a neurólogos, psiquíatras, biólogos, ingenieros, matemáticos y físicos a que se ocupen de algunos de los muchos problemas y teorías desconcertantes de este campo de la bionica. Si bien no se han abarcado todos los aspectos de esta ciencia, hemos tenido la gran fortuna de reunir un grupo tan destacado de científicos.

TEN HOOPEN y VERVEEN describen unos experimentos realizados sobre nodos de Ranvier aislados. Para elucidar el fenómeno de las fluctuaciones de la excitabilidad —que es la propiedad de un elemento neural de responder a una entrada no aleatoria con cierta probabilidad— se lo compara con ciertos estudios sobre un modelo: se lo considera resultante de una forma de "ruido [de fondo]" biológico. Los resultados obtenidos a partir de experimentos con animales y de estudios de modelos ofrecen un parecido muy estrecho: en ambos casos se observa que la relación entre la probabilidad de respuesta y la intensidad del estímulo se aproxima bastante a la función de distribución de Gauss.

En su trabajo sobre el enfoque desde el punto de vista del ingeniero del problema de la integración biológica, COWAN (del laboratorio de MCCULLOCH del Massachusetts Institute of Technology) debate la necesidad de emplear lógicas polivalentes y (o) la teoría de la información cuando se tienen unidades y conexiones ruidosas. Hace ver que es posible construir computadoras redundantes que posean una frecuencia de error arbitrariamente pequeña, de forma que no sean enteramente redundantes, sino que tramiten [*process*] una fracción finita de la información. Un resultado

muy interesante es que una computadora de este tipo no requiere que se la conecte con toda precisión; o sea, que se puede tolerar cierta proporción (acotada) de errores de conexión; y ello puede conducir a una aplicación interesante a la construcción de modelos matemáticos de la estructura cortical.

El comportamiento secuencial de un conjunto de neuronas idealizadas es lo que constituye el asunto del artículo de LATOUR. Este autor ha investigado las redes nerviosas con métodos matemáticos parecidos a los de la teoría de retículas lineales secuenciales; y, asumiendo que este enfoque sea también válido para describir sucesos corticales, explica de una forma muy sencilla las periodicidades observadas en los experimentos de tiempo de reacción.

El estudio de GEORGE es un admirable ejemplo de exposición lúcida de la comparación entre autómatas finitos y el sistema nervioso. Su conferencia se ocupa primordialmente del tipo de red lógica que representa un género de sistema nervioso idealizado o conceptual, y describe la medida en que podemos hacer que estos autómatas se ajusten a las hechos descubiertos por los neurofisiólogos y neuroanatomistas; asimismo presenta cierto número de sugerencias generales destinadas a poner el sistema nervioso conceptual más a la par con los hechos empíricos con que hoy contamos.

NIGRO, que da un esquema del córtex cerebral basado principalmente en los datos de la escuela de BIKOV, emplea un enfoque distinto: nos ofrece una interpretación teorética del mecanismo de los reflejos condicionados, a los que sería posible actuar merced a que suscitan una pauta bien establecida anteriormente en las estructuras cerebrales.

NAPALKOV representaba al grupo de cibernética de la Universidad estatal de Moscú. En su escrito expone un análisis de ciertas formas complejas de actividad del cerebro sobre la base de un estudio de los procesos de información; y, además de la parte teorética, se ocupa de la explicación cibernética de ciertos fenómenos patológicos, tales como la hipertensión.

Un rasgo muy interesante de la neurocibernética es que se realicen trabajos a niveles tan diferentes, lo cual es particularmente cierto en el caso de ZEMAN, que trata en su comunicación de vincular los símbolos del contenido del lenguaje, las traducciones por máquina del lenguaje informativo y el proceso de registro, elaboración y transmisión de la información en el cerebro. La totalidad de este proceso —el que llama "escritura cerebral"— se encuentra vinculada muy estrechamente, según supone, con la formación de "campos cerebrales" en los que se transformen en símbolos ciertos fenómenos temporales, de modo parecido a como ocurre en las gráficas del "lenguaje visible" o en las imágenes del sonido de Chladni; supone luego que cada campo cerebral está vinculado a determinada energía

de excitación y a cierto contenido informativo, que se manifestaría en forma de un espectro semántico específico, y esboza un modelo matemático para poner en relación los resultados de la fisiología cerebral con la matemática y con la lingüística.

FRANK y MÜLLER han representado al activo grupo de STEINBUCH, radicado en el Institut für Nachrichtenverarbeitung und Nachrichtenübertragung (Instituto de tramitación y transmisión de la información), de la Universidad de Karlsruhe. El primero enlaza la psicología de la información y la telecomunicación valiéndose de modelos conceptuales y perceptivos, y sus ideas adquieren una representación muy atractiva con la matriz de aprendizaje para los procesos de reconocimiento de configuraciones [*patterns*]; también describe un dispositivo que funciona de modo invariante frente a traslaciones, transformaciones afines y torsiones.

MÜLLER se ocupa particularmente de las características y las configuraciones de las matrices de aprendizaje. En una matriz de este tipo pueden distinguirse una fase discente y una fase facultada *, que operan consecutivamente: cuando se completa la primera empieza la otra, durante la cual un dispositivo de detección de máximos señala las características (previamente aprendidas) de una configuración determinada que se presente a la matriz. Examina también la construcción y algunas aplicaciones de estas matrices, haciendo ver lo sencillo de su uso en muchos aspectos.

Los dos trabajos siguientes se consagran a las relaciones de entrada y a la homeóstasis de los órganos de los sentidos. ZOPF debate, más desde el punto de vista fisiológico y anatómico, la importancia cibernética de: *a*) la inervación del aparato motor accesorio de los sistemas sensoriales, y *b*) las fibras eferentes que acaban en las células receptoras o en sus proximidades: la primera clase puede desempeñar un papel en la atenuación o normalización del volumen de intensidad del estímulo (lo cual constituye, desde luego, una hipótesis muy interesante), y la segunda, cuya existencia real ha preocupado siempre al neuroanatomista, se estudia en relación con las configuraciones de estímulos —la utilidad de este regimiento sensorial eferente se encuentra principalmente en la dirección de explotar las restricciones del estímulo (redundancia de la entrada).

HUANT ataca el problema de la información sensorial más desde el punto de vista psiquiátrico, y traza una correlación muy estrecha entre la interacción de la información sensorial con la ya existente en el cerebro, por un lado, y los ritmos α del electroencefalograma, por otro (teniendo en cuenta otras muchas investigaciones, parece probable que estas relacio-

* El original habla de «fase cognoscente» [*knowing phase*], pero el castellano permite verter la expresión original alemana del autor del trabajo [*Kannphase*] con una leve alusión semántica reminiscente de la de tal expresión, cosa, al parecer, imposible en inglés. *(N. del T.)*

nes no estén, en modo alguno, muy claras). La elucidación de sólo unos pocos de los muchos desconcertantes problemas que nos presenta el mecanismo básico de la memoria y del pensar debería ser una de las metas principales de la neurocibernética.

El estudio de SAUVAN y el de STANOULOV se ocupan de la construcción de modelos que expliquen algunos de los parámetros de la memoria y el pensar humanos.

La investigación de BRAITENBERG combina la neurohistología clásica con la lógica de las redes nerviosas. En ella propone un método para llevar a cabo el análisis funcional de las estructuras de las sustancias grises del cerebro; se trata de un modo de estudio comparativo que utiliza técnicas tales como el método de tinción de Golgi y una estimación cuantitativa de la mielina, y cuya utilidad ha quedado ya demostrada en un análisis de la corteza cerebelosa: el autor ha sido capaz de describir la estructura de la capa molecular del cerebelo mediante un esquema funcional que representa un reloj que traduce distancias en intervalos temporales, y viceversa.

PASK debate extensamente los modelos cibernéticos del aprendizaje y de la cognición en sistemas evolutivos y en cerebros; en su revisión nos proporciona un hermoso panorama de los modelos y concepciones del aprender, y su propio modelo esclarece, entre otras muchas propiedades, el papel de las funciones "distribuidas" o "no localizadas", así como posee una interesante asimetría que parece dar cuenta de algunas de las peculiares discontinuidades del comportamiento que están vinculadas a la "atención" y al "caer en la cuenta" [*insight*].

Los cinco trabajos siguientes se ocupan de algunas de las implicaciones neurológicas y psiquiátricas de los modelos cibernéticos.

NAYRAC nos ofrece un panorama general sobre sus ideas acerca de los problemas de la no linealidad en la neurología clínica y la experimental. CLARK discute las máquinas adaptadas y su posible uso en la psiquiatría, proponiendo el empleo de una máquina de esta índole —en forma de juego que se enseña a los enfermos por medio de una máquina de enseñar de Pask— como posible manera de llegar a mediciones diagnósticas objetivas de los pacientes psiquiátricos.

La comunicación de ROSS ASHBY y sus colaboradores se dedica a la importancia de la inestabilidad esencial en los sistemas dotados de umbrales.

La conferencia de RASHEVSKI une la biología matemática, la homeóstasis y la cinética del sistema endocrino con determinados extremos psiquiátricos.

WELLS no cree que el sistema nervioso desempeñe un papel predominante en muchos aspectos: la tesis de su trabajo es que tal sistema se desarrolla tardíamente en la evolución, y que el sistema nervioso central no fue esencial hasta que los movimientos rápidos (propios del organismo)

condujeron a perfeccionar los "receptores a distancia". Uno de sus argumentos principales es que la mayor parte de la organización esencial que hemos de estudiar se constituyó antes incluso que el sistema autónomo —bien al principio, pues, de la escala evolutiva—, y propone la interesante hipótesis de que "esta organización involucra una aplicación o correspondencia [*mapping*] del conjunto de cromosomas *sobre* el organismo total y la del conjunto de organismos supervivientes *en* el conjunto de cromosomas".

Experimentos con un modelo de nervio sobre fluctuaciones de la excitabilidad

Por M. TEN HOOPEN y A. A. VERVEEN

INTRODUCCION

Si se estimula una fibra nerviosa con impulsos eléctricos rectangulares idénticos de intensidad cercana a la del umbral, responde con un potencial de acción solamente en parte de las pruebas. Este fenómeno de fluctuación de la excitabilidad, o sea, la propiedad que tiene la fibra de responder en la zona del umbral a una entrada no aleatoria (fija) con cierta probabilidad, revela la existencia en la excitación de un factor de ruido; y se trata de una propiedad endógena de la fibra, según puede concluirse de la independencia mutua de las reacciones de dos fibras que constituyan una preparación única y a las que se aplique el mismo estímulo (PECHER, 1939).

Se ha demostrado (VERVEEN, 1960 y 1961) que cuando se estimula a baja frecuencia (un impulso cada dos segundos) con estímulos idénticos,

1) las sucesivas reacciones tienen todas las veces la misma probabilidad de aparición, independientemente de las reacciones precedentes;

2) la relación entre la probabilidad de respuesta y la intensidad del estímulo se aproxima bastante a la función gaussiana de distribución;

3) los dos parámetros de esta función, a saber, el umbral (la media) y la dispersión (la desviación típica), dependen de la duración del estímulo: el umbral de estimulación (50 %) está relacionado con la duración del estímulo en forma ligada a las características de fuerza y duración, y el coeficiente de variación —el cociente entre la dispersión y el umbral, llamada dispersión relativa (DR)— resulta ser independiente de los parámetros del estímulo y aproximadamente igual para impulsos cortos (0,25 mseg) y largos (2,5 mseg);

4) durante el período de recuperación se presentan también fluctuaciones de la excitabilidad, así como mientras exista una corriente subreobásica * y después de aplicar estricnina y uretano —sólo experimentan modificaciones los parámetros de la relación entre probabilidad e intensidad—, y

* Esto es, inferior a la intensidad reobásica (= aquella a la que se alcanza el punto de inflexión o fluencia en la gráfica de la función, y, por tanto, en este caso, la del umbral). *(N. del T.)*

5) la DR, o medida del ancho del umbral relativamente al valor de éste, está en relación con el diámetro de la fibra: cuanto más pequeño sea, mayor será la DR (VERVEEN, 1962).

EXPERIMENTOS CON MODELOS

Uno de los posibles orígenes de las fluctuaciones del umbral (cf. FRISHKOPF y ROSENBLITH, 1958) podrían ser las variaciones estadísticas locales del potencial de membrana debidas a ruido de agitación térmica (PECHER, 1939; FATT y KATZ, 1952); en tal caso, la DR podría constituir una medida del potencial eficaz del ruido de membrana relativamente al umbral del potencial de ésta (VERVEEN, 1962).

En tanto no seamos capaces de estudiar directamente el ruido estrictamente biológico —en el caso que acabamos de mencionar, por ejemplo, como pequeñas perturbaciones del potencial de membrana en reposo (BROCK *et al.*, 1952)—, pueden obtenerse datos ulteriores de un modo indirecto, con tal de que supongamos que este fenómeno se debe a un ruido de la tensión o voltaje.

Con este fin hemos llevado a cabo experimentos con un modelo, guiados por una intención doble: en primer lugar, para llegar a entender qué influencia tiene el ruido sobre un dispositivo capaz de dispararse, y, segundo, con objeto de poner a punto métodos que permitan un estudio más profundo de los procesos que acontecen en la fibra nerviosa.

Estamos trabajando asimismo sobre un modelo matemático, cuyo problema central está vinculado al de la inversión de los ejes, tema muy conocido en el campo de la teoría de la información y detección. En nuestro caso, la dificultad correspondiente se presenta en forma de una función dependiente del tiempo; en estudios anteriores sobre la interpretación teorética de las medidas de umbrales de tejido excitable en presencia de ruido (RASHEVSKI, 1948; HAGIWARA, 1954), lo único que parece haber estado en cuestión ha sido la distribución de la amplitud (que solía suponerse gaussiana) de la función aleatoria, y no la cuota de cambios (o espectro frecuencial) de la variable; pero VIERNSTEIN y GROSSMAN (1960) han prestado atención recientemente a la necesidad de incluir en los cálculos este último aspecto del proceso.

Por razones de sencillez hemos querido comenzar con un dispositivo analógico muy simple, ya que en el presente estadio de la indagación una impresión general tiene más valor que las soluciones numéricas proporcionadas por modelos muy complejos. Tampoco hemos tomado en consideración otros problemas más intrincados, por ejemplo, los referentes al potencial local y sus fluctuaciones (DEL CASTILLO y STARK, 1952).

Por consiguiente, esta comunicación no expone una investigación com-

pleta y acabada; estamos justamente empezando a entender algo el comportamiento de un dispositivo disparable en presencia de ruidos.

Para realizar este dispositivo nos hemos valido del modelo electrónico de neurona de Harmon (HARMON, 1959). El estímulo, proporcionado por un generador de impulsos *Tektronix,* alimentaba este modelo a través de un circuito que lo transformaba de la misma manera que parece ocurrir en un nodo de Ranvier * de rana arbitrario (fibra A, situada en un nervio ciático intacto de rana) aislado funcionalmente, que era uno de los elementos neurales sometidos a investigación en los experimentos antes mencionados. Dicha transformación se deduce del curso temporal de la excitabilidad tras aplicación de un impulso constante no eficaz y de larga duración, así como de la relación entre su fuerza y su duración.

El ciclo de excitabilidad después de aplicar un estímulo constante en el instante $t = 0$ tiene la forma:

$$f(t) = \exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2) \text{ , siendo } \tau_1 > \tau_2.$$

Cuando se trata de un estímulo rectangular de duración finita, T, que comienza en $t = 0$, la función transformadora del estímulo puede escribirse:

$$f(t) \text{ para } 0 \leqslant t \leqslant T,$$

$$f(t) - f(t - T) \text{ para } t > T.$$

El ciclo de excitabilidad resultante y la relación entre fuerza y duración de este modelo son comparables a los del nodo de la rana estudiado en las condiciones mencionadas más arriba.

El resto del modelo consta esencialmente de un multivibrador monoestable: en cuanto la tensión de entrada alcanza un valor crítico lanza un impulso, y al umbral interno del dispositivo se le superpone ruido de una calidad conocida. Este ruido entra en el modelo, pasando por un circuito apropiado y un filtro de pasabanda *(Kront-Hite:* máx., 20-20.000 c/s; pendiente, 24 db/octava), procedente de un generador de ruido "blanco" ** *(Peekel:* 20-20.000 c/s). En los experimentos a que vamos a referirnos hemos usado ruido blanco de banda limitada, con intensidad y espectro frecuencial variables a voluntad.

En ellos no nos hemos ocupado en absoluto del período de recuperación, aun cuando ya está listo para una investigación posterior otra versión del modelo dotada de una fase supranormal y una segunda fase sub-

---

* Se denominan así (o *estrangulaciones de Ranvier)* los estrechamientos que se encuentran más o menos regularmente espaciados en las fibras mielinadas, y que son debidos a la interrupción (gradual, a uno y otro lado del nodo) de la hélice de mielina; es decir, son zonas con la fibra nerviosa sin vaina mielinada. *(N. del T.)*

** Esto es, «en blanco» respecto de todo mensaje: puramente aleatorio. *(Nota del traductor.)*

normal (del período relativamente refractario)*; hicimos, intencionadamente, que la duración del período de recuperación fuese mucho más breve en el modelo de lo que lo es en la fibra, gracias a lo cual hemos podido someterlo a frecuencias más elevadas (160 mseg de intervalo entre estímulos) que las que permite el largo período de recuperación de la fibra nerviosa, que exige una frecuencia de estimulación no superior a una cada 2 seg —si no se obrase así se producirían efectos de acumulación que complicarían la interpretación de los resultados experimentales—.

RESULTADOS

En la primera serie de observaciones efectuadas con nuestro modelo nos limitamos a usar ruido con un espectro de frecuencias de 20 a 1.000 c/s, y observamos que su comportamiento global es aproximadamente igual al de la fibra nerviosa en cuanto a que: 1) existe una región de umbral (fig. 1);

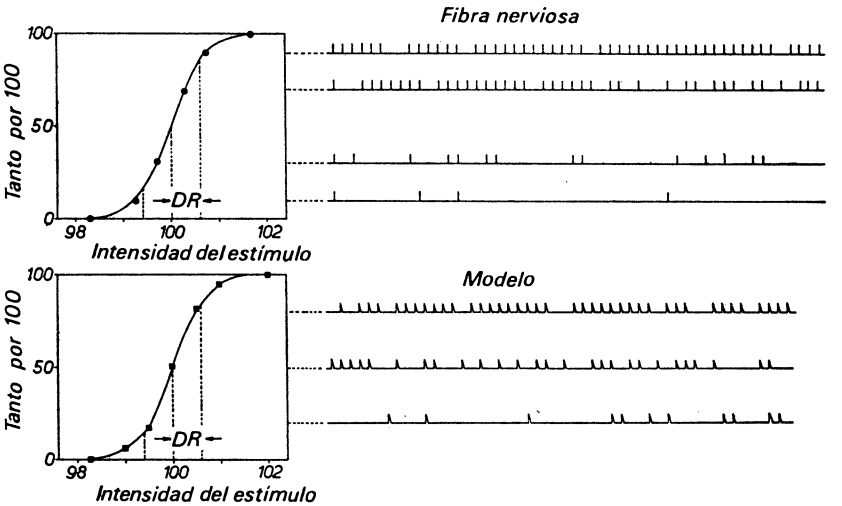


Fig. 1. Relación entre la probabilidad de respuesta y la intensidad del estímulo, en tanto por ciento del umbral. Un estímulo cada 2 seg.

* Alude a las últimas de las sucesivas fases de excitabilidad de las neuronas típicas de los nervios somáticos periféricos, que son: *a*) el de adición latente (en el que pueden integrarse impulsos simultáneos o sucesivos subliminales para dar lugar a que «se dispare» la neurona, esto es, recorra su axón un potencial de acción); *b*) el absolutamente refractario, muy breve (en el que ninguna excitación puede crear otra descarga), seguido del (primer) período relativamente refractario (en el que es difícil originar otro «disparo»); *c*) el supranormal, en el que la excitabilidad es mayor que la ordinaria, y *d*) el subnormal, del (segundo) período relativamente refractario (el más largo de todos, en el cual la excitabilidad es inferior a la normal). *(N. del T.)*

2) con una duración dada del estímulo, la relación entre la probabilidad de respuesta y la intensidad del estímulo puede representarse aproximadamente por una función gaussiana de distribución; 3) ambos parámetros, el umbral y la dispersión, dependen de la duración del estímulo (fig. 2)

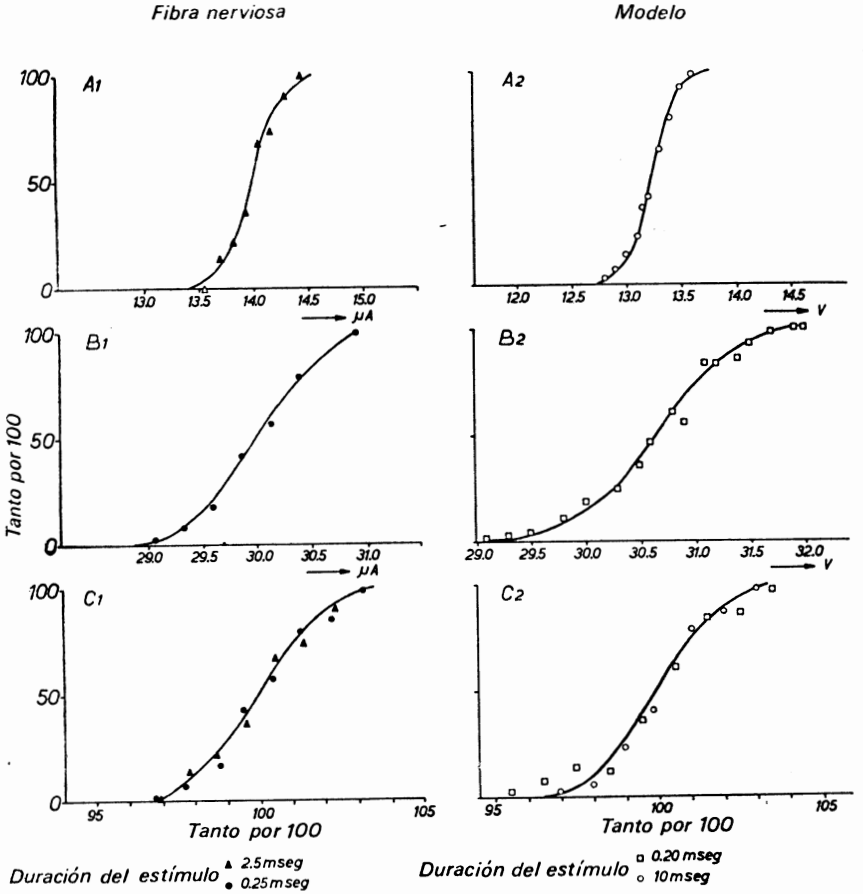


Fig. 2. Relación entre la probabilidad de respuesta y la intensidad del estímulo para dos duraciones de éste (A, B), y la misma relación después de normalizar el umbral (C).

(como ya hemos dicho antes, en la fibra nerviosa, la DR es la misma para impulsos cortos y largos; en el modelo sucede igual sólo cuando las características del ruido se ajustan a ciertas condiciones, propiedad de que nos ocuparemos más adelante), y 4) la relación entre la probabilidad de respuesta y la duración del estímulo —para intensidades diversas, pero fijas en cada prueba— posee iguales propiedades en uno y otro caso (fig. 3): las curvas correspondientes son asimétricas por la derecha y tanto más

abruptas cuanto mayor es la intensidad, y con intensidades del estímulo reobásicas no se llega a alcanzar el 100 por 100.

Parece, pues, que la concordancia entre los experimentos con el modelo y los fisiológicos que habíamos realizado es satisfactoria; no obstante lo cual, la cuestión reside en si el modelo puede emplearse como instrumento que permita un estudio más a fondo de los procesos que tengan lugar en la fibra nerviosa.

Juntamente con las fluctuaciones de excitabilidad se observa una variación del intervalo temporal entre la iniciación del estímulo y el eventual paso del potencial de acción por la parte de la fibra nerviosa situada bajo

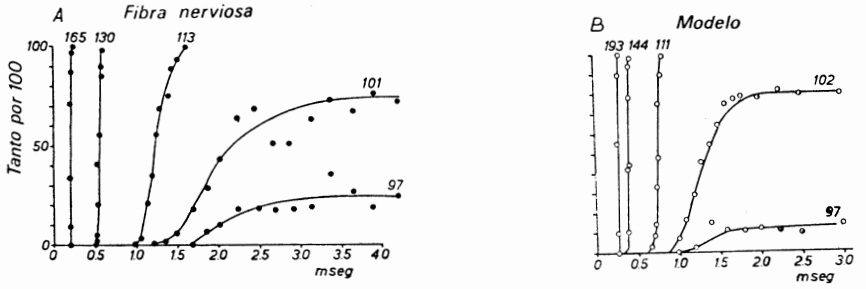


Fig. 3. Curvas de duración-probabilidad. La intensidad del estímulo, en tanto por ciento de la reobase.

los electrodos registradores. Se trata de una fluctuación del tiempo de respuesta que aparece en el punto de estimulación como una variación de la latencia, es independiente del punto de la fibra nerviosa en que se hayan colocado aquellos electrodos (BLAIR y ERLANGER, 1933) y probablemente se debe a los distintos instantes en que el proceso de excitación iniciado por el estímulo hace que se dispare el nervio, en virtud de las fluctuaciones de la excitabilidad de éste (ERLANGER y GASSER, 1937).

En el modelo encontramos el mismo fenómeno. Una investigación orientadora de la distribución de la latencia en el modelo cuando se lo estimula con un impulso de larga duración (10 mseg) reveló, en efecto, las siguientes características (fig. 4): cuanto más elevada sea la intensidad del estímulo, más breve es la latencia media entre él y la respuesta, y la dispersión es más reducida; además, los histogramas son asimétricos por la derecha, en particular cuando el estímulo es de pequeña intensidad.

Al investigar lo que ocurre en una fibra nerviosa de rana (asimismo sometida a impulsos de 10 mseg de duración) se hizo patente que se tienen las mismas características predichas por el modelo (fig. 4).

Se advertirá que estas distribuciones de la latencia guardan un parecido muy grande con las distribuciones de intervalo estudiadas por BULLER *et al.* (1953) y por HAGIWARA (1954) para el huso muscular, por GROSSMAN y VIERNSTEIN (1961) para neuronas en situación de adaptación lenta

y descarga espontánea del núcleo coclear y por AMASSIAN *et al.* (1961) para la actividad espontánea de neuronas de la formación reticular del mesencéfalo.

Es probable que este fenómeno permita una investigación más ceñida de las características del ruido; sin embargo, por ahora no se habían rea-

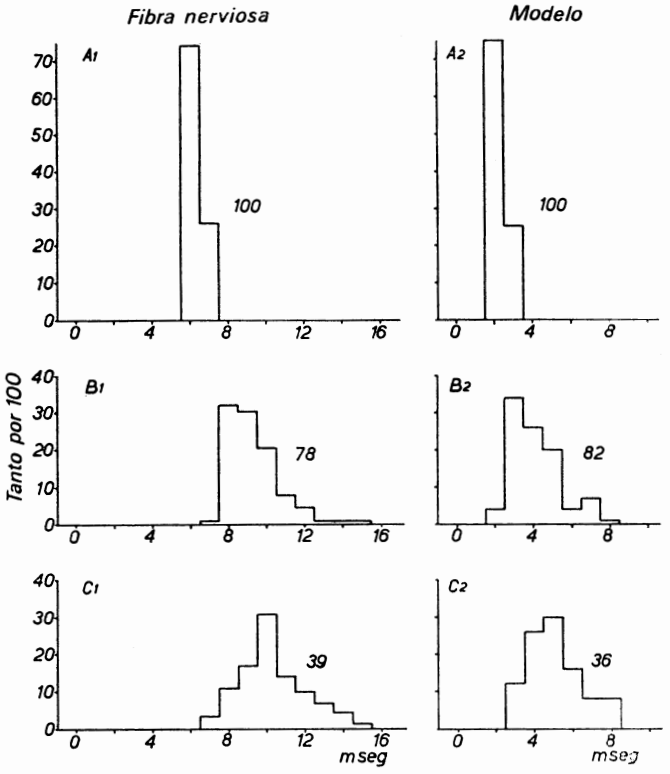


Fig. 4. Histogramas de distribución de la latencia. Intensidad del estímulo, en tanto por ciento de la reobase: gráfica A1, 110,0; B1, 100,3; C1, 99,7; A2, 103,0; B2, 100,8, y C2, 99,8 (los números junto a los histogramas indican el tanto por ciento de respuestas). En todos los casos la duración del estímulo fue de 10 mseg. En la fibra nerviosa, la latencia incluye el tiempo de conducción a lo largo de 12 cm (fibra A de rana).

lizado estudios con modelo de las relaciones existentes entre tipos diferentes de ruido y distribuciones de la latencia.

Con objeto de facilitar las cosas, elegimos la función que relaciona probabilidad e intensidad como medio de estudiar la influencia ejercida por los diferentes tipos de ruido y de comparar, a este respecto, el comportamiento del modelo y el de la fibra nerviosa. (La DR constituye, en particular, una medida muy manejable.)

El procedimiento que hemos empleado es el del análisis de *probites*

(FINNEY, 1952), que se aplica a cualquier conjunto de datos que se refieran a la relación entre probabilidad de respuesta e intensidad del estímulo y se basa en una transformación de la función de distribución de Gauss que la convierte en lineal. En la figura 5 se representa la forma en que los tantos por ciento se convierten en *probites.*

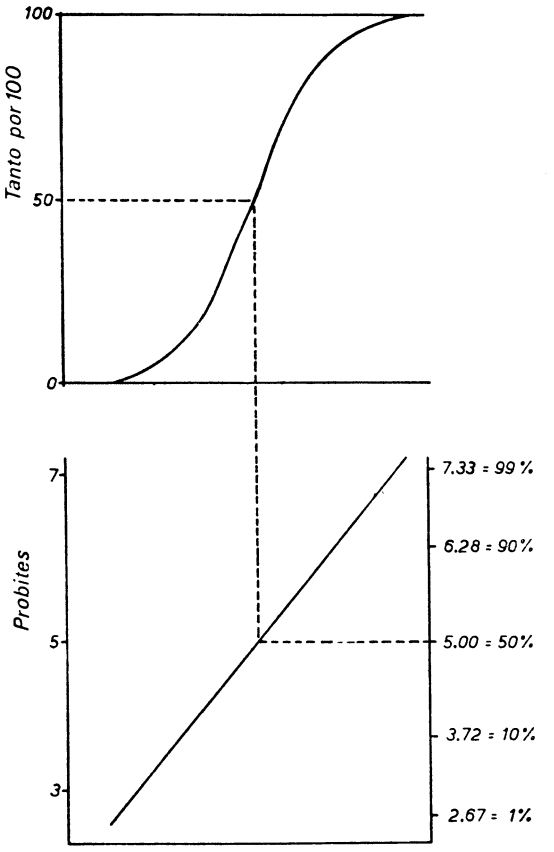


Fig. 5. Transformación en *probites* de una función gaussiana de distribución (FINNEY, 1952).

Mediante esta transformación, la inversa de la desviación típica es visible gráficamente, como pendiente de la función transformada; pero, debido a la técnica utilizada por nosotros (a saber, que hemos representado en las abscisas la intensidad en unidades del umbral), la recíproca de la pendiente no constituye una estimación de la desviación típica, sino del coeficiente de variación, o sea de la DR.

Para obtener cada conjunto de datos nos hemos valido del siguiente método. Reajustamos la intensidad del estímulo a un valor tal que, cuan-

do se lo estimule, el modelo reaccione con una probabilidad del 50 % poco más o menos, valor que proporciona, pues, una estimación del umbral; y variamos luego aquella intensidad por escalones, cada uno de los cuales es igual a un tanto por ciento fijo (el 1 %) del valor del umbral. De este modo se explora toda la zona de éste, aplicando en cada escalón cierto número (100) de estímulos, registrando el número total de reacciones por

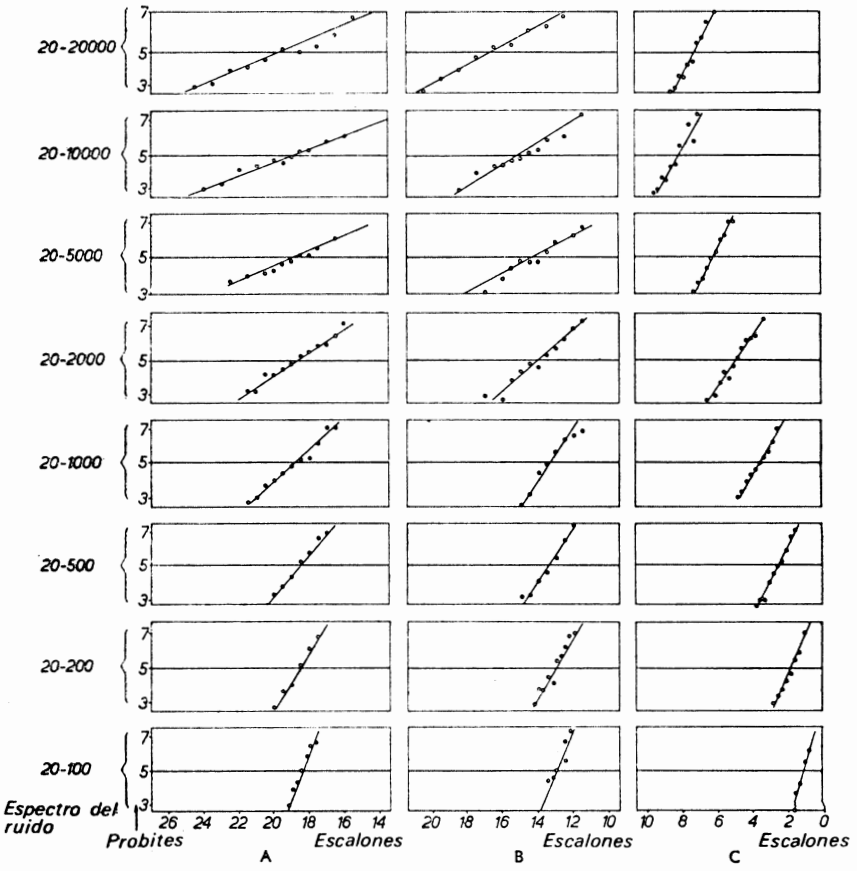


Fig. 6. Relación entre la probabilidad y la intensidad tras la transformación en *probites*. Duración del estímulo: 0,2 mseg (A), 1,0 mseg (B) y 10 mseg (C). El valor de cada escalón es un 1 % de la intensidad de umbral del estímulo. El ancho de banda del espectro frecuencial del ruido está indicado, en c/s, a la izquierda de las gráficas. Función de transformación del estímulo: $1 - \exp(-t/\tau)$, siendo $\tau = 0{,}5$ mseg. Ruido de intensidad normal (véase la explicación en el texto).

escalón y convirtiendo este último número en tanto por ciento y en *probites*. Una vez efectuada esta transformación se determinan gráficamente los valores estimados del umbral y de la DR; no hemos corregido los

de ésta para tener en cuenta el corrimiento del umbral de estimulación (el 50 %) que sigue a un cambio del nivel de ruido o de su espectro frecuencial, pero esta omisión no altera de modo notable los valores estimados para la DR (lo hace en menos del 10 %).

En las figuras 6, 7 y 8 pueden verse los resultados de las mediciones referentes a la relación entre intensidad y probabilidad para distintas intensidades y espectros frecuenciales del ruido.

Las figuras 9 y 11 ofrecen un resumen gráfico de las estimaciones de

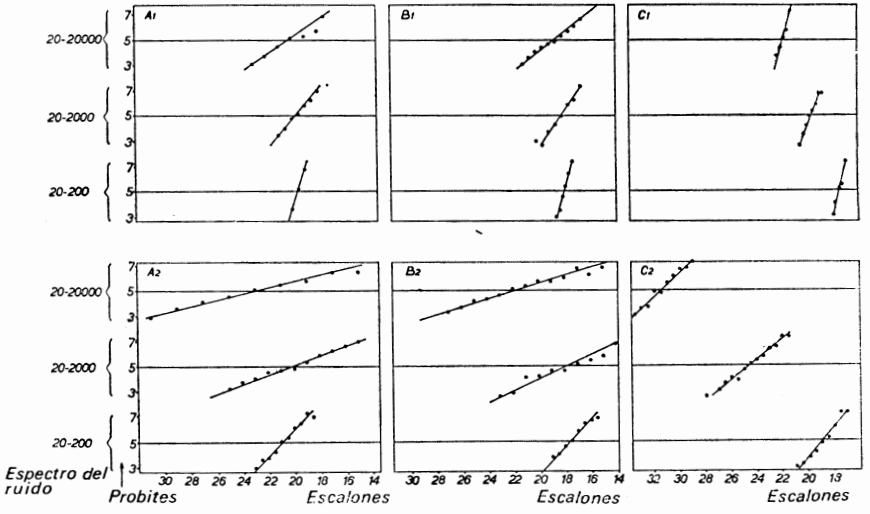


Fig. 7. Relación entre la probabilidad y la intensidad tras la transformación en *probites*. Duración del estímulo: 0,2 mseg (A), 1,0 mseg (B) y 10 mseg (C). El valor de cada escalón en un 1 % de la intensidad de umbral del estímulo. El ancho de banda del espectro frecuencial del ruido está indicado, en c/s, a la izquierda. Función de transformación del estímulo: $1 - \exp(-t/\tau)$, siendo $\tau = 0{,}5$ mseg. Ruido de intensidad, 5 db por debajo (A1, B1 y C1) y 5 db por encima (A2, B2 y C2) de la normal.

la DR, en tanto que en la 10 se presenta un ejemplo del grado de reproducibilidad de las mediciones. Aunque hemos estudiado diversos valores del límite superior del ancho de banda frecuencial del ruido, reproducimos en las figuras 9 y 11, con objeto de facilitar la inspección, únicamente los resultados correspondientes a 20.000, 2.000 y 200 c/s.

Hemos empleado tres intensidades de ruido: una que hemos llamado normal y otras dos a 5 db por encima y por debajo de aquélla, respectivamente. El valor medio cuadrático (v. m. c.) de la amplitud del ruido con respecto al umbral interno es de 0,005, aproximadamente, en el caso de la intensidad normal y cuando la banda de frecuencias abarca de 20 a 20.000 c/s; los v. m. c. correspondientes a las otras intensidades son entonces, para la misma banda frecuencial, un 77 % mayor y un 44 % me-

nor, respectivamente, que aquél. En cuanto a duración del estímulo, hemos trabajado con tres distintas: 0,2, 1,0 y 10 mseg.

Las figuras 6, 7, 9 y 10 se han dibujado utilizando una función de transformación del estímulo, $f(t)$, de la forma $1 - \exp(-t/\tau)$, siendo $\tau = 0{,}5$ mseg; nos hemos ajustado en la mayoría de los casos a esta

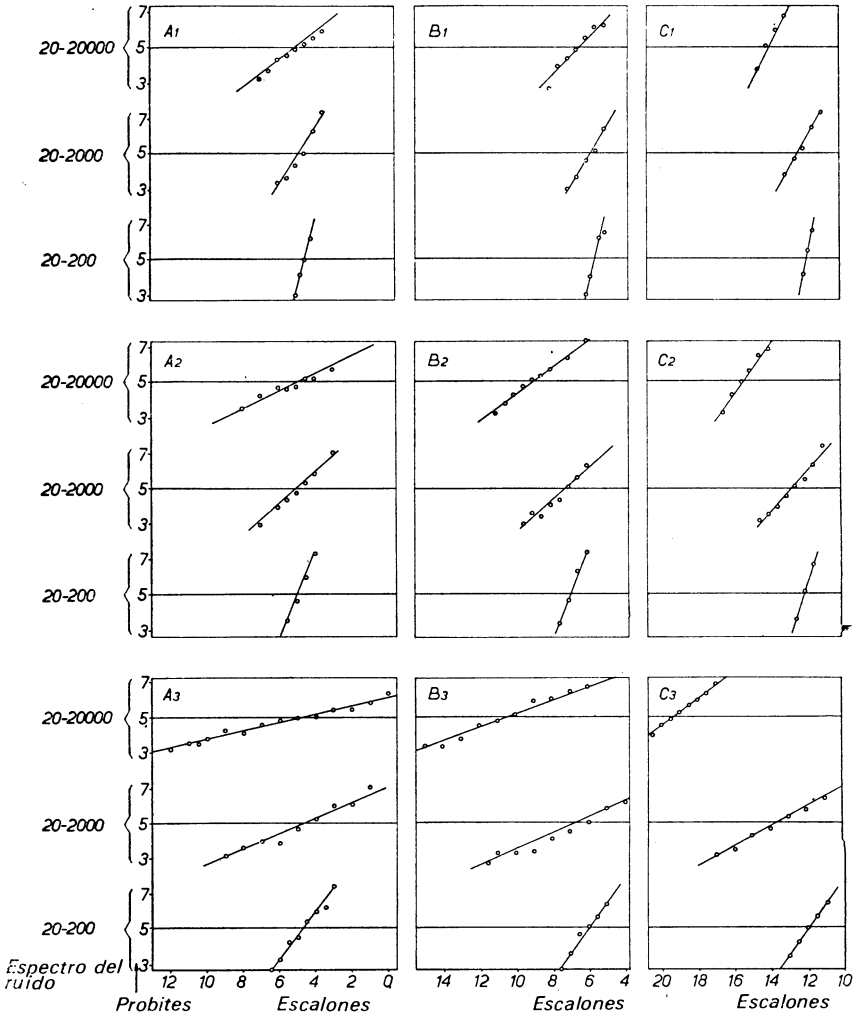


Fig. 8. Relación entre la probabilidad y la intensidad tras la transformación en *probites*. Duración del estímulo: 0,2 mseg (A), 1,0 mseg (B) y 10 mseg (C). El valor de cada escalón es un 1 % de la intensidad de umbral del estímulo. El ancho de banda del espectro frecuencial del ruido está indicado, en c/s, a la izquierda. Función de transformación del estímulo: $\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)$, siendo $\tau_1 = 6{,}7$ mseg y $\tau_2 = 0{,}5$ mseg. Ruido de intensidad normal (A2, B2 y C2), 5 db por debajo (A1, B1 y C1) y 5 db por encima (A3, B3 y C3) de ella.

transformación, que es comparable a la de una fibra nerviosa que no se acomode, con objeto de tener resultados de fácil interpretación.

La función $f(t)$ está dada por $\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)$, siendo $\tau_1 = 6{,}7$ mseg y $\tau_2 = 0{,}5$ mseg, para las figuras 8 y 11; ello corresponde al caso, ya mencionado, de la fibra A de la rana.

Puede advertirse que al modificarse el límite superior de las frecuencias del ancho de banda, manteniendo fijo el inferior a 20 c/s y con estímulos de una duración fija, se producen los siguientes efectos: 1) al aumento del ancho de banda hace que baje el umbral, y 2) la DR aumenta, al menos para valores pequeños del límite superior de las frecuencias.

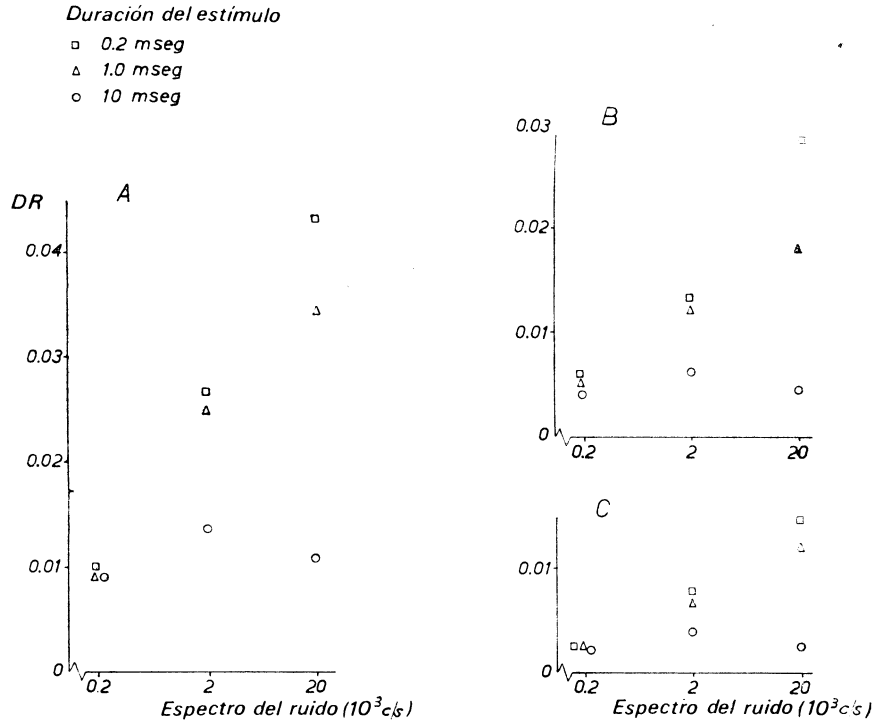


Fig. 9. Dispersión relativa, DR, en relación con la duración del estímulo, la intensidad del ruido y su espectro de frecuencias. Función de transformación del estímulo: $1 - \exp(-t/\tau)$, siendo $\tau = 0{,}5$ mseg. Ruido de intensidad normal (B), 5 db por encima (A) y 5 db por debajo (C) de ella.

Cuando se comparan entre sí estímulos de duraciones distintas se observa que la depresión del umbral al aumentar el ancho de banda es más pronunciada cuando el estímulo es largo que cuando es breve, en tanto que la variación de la DR es más fuerte con estímulo breve que con largo. Ambos efectos son más marcados con ruido de intensidad fuerte que con débil.

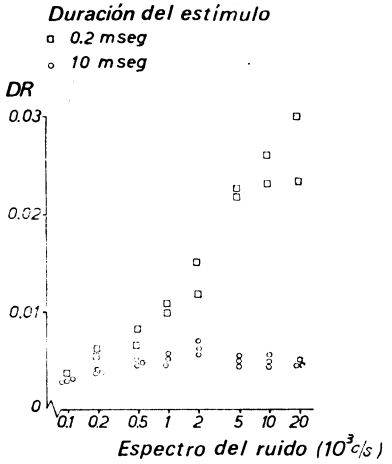


Fig. 10. Análoga a la figura 9B, con objeto de hacer ver el grado de reproducibilidad.

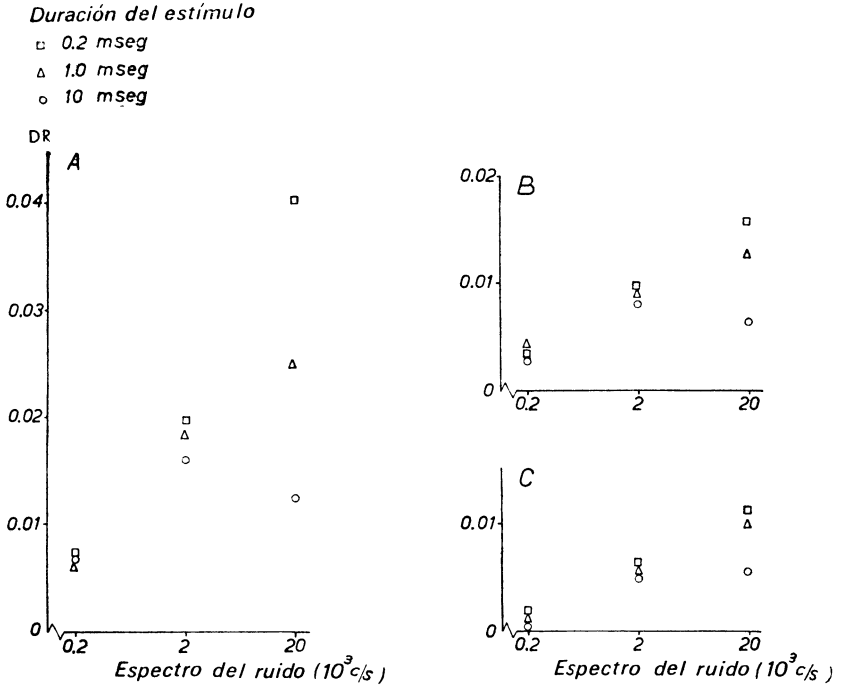


Fig. 11. Dispersión relativa, DR, en relación con la duración del estímulo, la intensidad del ruido y su espectro de frecuencias. Función de transformación del estímulo: $\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)$, siendo $\tau_1 = 6{,}7$ mseg y $\tau_2 = 0{,}5$ mseg. Ruido de intensidad normal (B), 5 db por encima (A) y 5 db por debajo (C) de ella.

Podemos concluir que el ruido de ancho de banda e intensidad crecientes: 1) hace que una unidad capaz de dispararse se vuelva más excitable, efecto que es más pronunciado con estímulos de larga duración, y 2) aumenta la anchura de la región del umbral (relativamente al valor de éste), efecto que es más fuerte con estímulos breves.

DISCUSION

No se ha podido hacer patente en la fibra nerviosa el efecto que produce la intensidad del ruido sobre el umbral de los estímulos y sobre la DR, puesto que es imposible llevar a cabo mediciones de umbral en la misma fibra sin que haya fluctuaciones. Es concebible, sin embargo, que se modifique artificialmente el ruido biológico de una forma predecible sin alterar el mecanismo fundamental de ignición.

Es sabido que la estricnina eleva la gama del umbral (ERLANGER *et al.*, 1941), y un estudio de la influencia de este producto sobre la zona de fluctuación de las fibras A de la rana ha hecho ver que la DR aumenta, pero que no se aprecia influencia alguna sobre el umbral (VERVEEN, 1961).

En este último caso se emplearon estímulos de corta duración (0,12 mseg), de modo que lo hallado con nuestros experimentos sobre modelo permitía esperar los resultados conseguidos y, además, que cuando se estimule con impulsos largos se produzca una depresión del umbral tras tratamiento con estricnina. Tenemos planeados ciertos experimentos para averiguar si el nervio tratado con esta droga presenta o no este fenómeno cuando se lo estimula con impulsos largos (como puede predecirse a base de nuestros experimentos con modelo).

La independencia de la DR con respecto a la duración del estímulo nos proporciona ciertas indicaciones acerca de la naturaleza del ruido.

Teniendo en cuenta las figuras 9, 10 y 11, puede verse que, para ciertas combinaciones de intensidad y banda de frecuencias del ruido, la DR del modelo es realmente la misma para las tres duraciones de estímulo empleadas (dentro de los errores experimentales y de preparación de los datos), lo cual significa, mientras se trate de ruido blanco con banda limitada, que la velocidad de fluctuación del ruido fisiológicamente eficaz no excede los 2.000 c/s, y que su límite superior puede muy bien encontrarse en los alrededores de los 500 c/s.

En sus experimentos sobre neuronas auditivas de primer orden valiéndose de ruido introducido desde el exterior, FRISHKOPF (1956) llega a un número mínimo de 2.000 estados por segundo, mientras que VIERNSTEIN y GROSSMAN (1960) han admitido la cifra de 1.000 estados por segundo en su estudio de las pautas de descarga neural.

Estos valores concuerdan con la conclusión a que hemos llegado arriba al comparar nuestros experimentos con modelo y con fibra nerviosa.

A ello se añade que BULLER *et al.* (1953) han lanzado la idea de que, probablemente, las fluctuaciones sumamente breves de la membrana producen un efecto muy escaso.

Hasta ahora se ha mantenido constantemente igual a 20 c/s el límite inferior del ruido estudiado en el modelo, pero es posible perfeccionar la investigación modificando asimismo este límite; ello no se ha podido hacer aún debido a otro punto en que concuerdan, de modo sorprendente, pero también algo incómodo, la fibra nerviosa y el modelo: la inestabilidad a largo plazo —o declinación— del umbral. Sus causas no están claras: la fibra nerviosa es una preparación biológica, cuyas propiedades se encuentran, por lo tanto, sometidas con el tiempo a cambios lentos (alteraciones metabólicas, deterioros); además, el umbral es sensible a los cambios de temperatura, de modo que es preciso realizar los experimentos en un ambiente a temperatura estrictamente regulada. Por su parte, los transistores del modelo son también sensibles a las influencias térmicas (que pudimos compensar en parte trabajando en un local térmicamente estabilizado), y cabe que entre también en juego una declinación a largo plazo del aparato estimulador.

Todas estas circunstancias obligan a trabajar con muestras pequeñas y, en consecuencia, a admitir discrepancias más bien grandes en los valores estimados del umbral y la DR; cabe reducir éstas incrementando la velocidad de muestreo, cosa practicable en el caso del modelo, como hemos explicado antes; pero no es posible hacer lo mismo con la fibra nerviosa, debido a su largo período de recuperación.

Así pues, las observaciones que hemos llevado a cabo sobre un modelo sencillo de nervio con ruido superpuesto al umbral y su comparación con el comportamiento de la fibra nerviosa sometida a estimulación han sacado a luz cierto número de rasgos y problemas de interés, que justifican un estudio ulterior de la fibra nerviosa (y del modelo).

RESUMEN

Para resumir nuestro trabajo concluimos que un modelo sencillo de nervio representa bastante satisfactoriamente las relaciones entre intensidad y probabilidad y entre duración y probabilidad que se encuentran en la fibra nerviosa. Parece ser que las características generales de la distribución de la latencia que predice el modelo son válidas en la fibra, e indican un medio de estudiar ulteriormente las características del "ruido" de las fibras nerviosas.

Al observar el comportamiento del modelo de nervio bajo ruidos de intensidad y ancho de banda frecuencial distintos se ha descu-

bierto que el aumento de la intensidad y el ancho de banda del ruido convierte en más excitable una unidad capaz de dispararse y ensancha la zona del umbral (con respecto al valor de éste), efecto este último que es más pronunciado con estímulos de corta duración.

Sometemos, finalmente, a discusión lo que estos hallazgos implican en lo que respecta a la fibra nerviosa real.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMASSIAN, V. E.; MACY, JR., J., y WALLER, H. J. (1961): Patterns of activity of simultaneously recorded neurons in midbrain reticular formation. *Annals of the New York Academy of Sciences, 89,* 883-895.

BLAIR, E. A., y ERLANGER, J. (1933): A comparison of the characteristics of axons through their individual electric responses. *American Journal of Physiology, 106,* 524-564.

BLAIR, E. A., y ERLANGER, J. (1935/36): On excitation and depression in axons at the cathode of the constant current. *American Journal of Physiology, 114,* 317-327.

BROCK, L. G.; COOMBS, J. S., y ECCLES, J. C. (1952): The recording of potentials with an intracellular electrode. *Journal of Physiology* (Londres), *117,* 431-460.

BULLER, A. J.; NICHOLLS, J. G., y STRÖM, G. (1953): Spontaneous fluctuations of excitability in the muscle spindle of the frog. *Journal of Physiology* (Londres), *122,* 409-418.

DEL CASTILLO, J., y STARK, L. (1952): Local responses in single medullated nerve fibres. *Journal of Physiology* (Londres), *118,* 207-215.

ERLANGER, J.; BLAIR, E. A., y SCHOEPFLE, J. M. (1941): A study on the spontaneous oscillations in the excitability of nerve fibres, with special reference to the action of strychnine. *American Journal of Physiology, 134,* 705-718.

ERLANGER, J., y GASSER, H. (1937): *Electrical Signs of Nervous Activity.* Philadelphia de Pa., University of Pennsylvania Press.

FATT, P., y KATZ, B. (1952): Spontaneous subthreshold activity at motor nerve endings. *Journal of Physiology* (Londres), *117,* 109-128.

FINNEY, F. J. (1952): *Probit Analysis.* Cambridge de Mass., Cambridge University Press.

FRISHKOPF, L. S. (1956): A probability approach to certain neuro-electric phenomena. *Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Technical Report 307.*

FRISHKOPF, L. S., y ROSENBLITH, W. A. (1958): Fluctuations in neural thresholds. *Symposium on Information Theory in Biology,* ed. de H. P. Yokey. Londres y Nueva York, Pergamon Press (p. 153).

GROSSMAN, R. G., y VIERNSTEIN, L. J. (1961): Discharge patterns of neurons in cochlear nucleus. *Science,* 134, 99-101.

HAGIWARA, S. (1954): Analysis of interval fluctuation of the sensory nerve impulse. *Japanese Journal of Physiology, 4,* 234-240.

HARMON, L. D. (1959): Artificial neuron. *Science, 118,* 72-73.

PECHER, C. (1939): La fluctuation d'excitabilité de la fibre nerveuse. *Archives internationales de Physiologie et de Biochémie, 49,* 129-152.

RASHEVSKY, N. (1948): *Mathematical Biophysics.* Chicago, University of Chicago Press.

VERVEEN, A. A. (1960): On the fluctuation of threshold of the nerve fibre. *Structure and Function of the Cerebral Cortex.* D. B. Tower and J. P. Schadé, Editors. Proceedings of the Second International Meeting of Neurobiologists, Amsterdam, 1959. Amsterdam, Elsevier Publishing Company (p. 282).

VERVEEN, A. A. (1961): *Fluctuation in Excitability.* Tesis de la University of Amsterdam.

VERVEEN, A. A. (1962): Fibre diameter and fluctuation in excitability. *Acta Morphologica Neerlando-Scandinavica, 5,* 79-85.

VIERNSTEIN, L. J., y GROSSMAN, R. G. (1960): Neural discharge patterns and the simulation of synaptic operations in transmission of sensory information. *Fourth London Symposium on Information Theory, september, 1960,* ed. de C. C. Cherry. Londres, Butterworth and Co.

El ataque al problema de la integración biológica con los métodos del ingeniero

Por J. D. COWAN

Según se ha podido estimar, en la síntesis de las macromoléculas se tramitan algo así como unos 4×10^{19} bitios * por segundo, y las células [de seres pluricelulares] y las bacterias producen sistemas macromoleculares que encierran *planos* del desarrollo futuro con cuotas de error del orden de 10^{-10} por bitio (QUASTLER, 1957). Asimismo se ha estimado que la cuota real de errores por cada molécula que entre en las síntesis macromoleculares es del orden de 10^{-2} (PAULING, 1960); suponiendo que puedan necesitarse 5 bitios por molécula, llegamos a la conclusión de que la cuota de errores del *sistema* es muy inferior a la correspondiente a sus *componentes,* lo cual hace pensar que dentro del sistema macromolecular existen varios mecanismos integradores que dominan de algún modo los funcionamientos erróneos y dan lugar a un sistema fiable.

Al parecer, el sistema nervioso central de los vertebrados presenta rasgos integradores parecidos. En la tramitación de señales, que realizan 10^{10} neuronas, aproximadamente, están involucrados, según las estimaciones hechas, unos 2×10^{13} bitios por segundo. Cada una de aquellas neuronas recibe muchas entradas y, según parece, computa cierta función bastante específica; desconocemos hasta qué punto es fiable tal computación, pero las evaluaciones realizadas de las fluctuaciones intrínsecas de las fibras nerviosas periféricas (VERVEEN, 1960) sugieren que una cuota de errores de 10^{-2} por bitio no es una cifra irrazonable. A ello se añade que la interconexión neuronal no semeja estar gobernada rígidamente, de suerte que habría que contar con la existencia de cierto grado de *aleatoriedad* en muchas regiones corticales. Así pues, hay partes extensas de la corteza cerebral que parecen comprender unas poblaciones heterogéneas de unidades cuyas interconexiones no están completamente determinadas y cuyo

---

* Como es sabido, el «bitio» (en inglés, *bit,* abreviatura de *binary digit,* que coincide con una palabra que significa «pizca», poco más o menos) es la unidad de información más aceptada, y representa la información aportada al resolver una situación indeterminada con dos estados equiprobables (únicos posibles); por ejemplo, al especificar cuál de los dos guarismos dígitos binarios 0 y 1 ocupa un lugar determinado en un número escrito en el sistema binario de numeración (sobre el que carezcamos de toda otra información). *(N. del T.)*

funcionamiento no se halla enteramente exento de errores. La cuota de errores media del conjunto del córtex es algo extremadamente difícil de determinar, y el autor no conoce estimación alguna de la cifra correspondiente; hay algunas pruebas, sin embargo, de que dicha cuota global es considerablemente inferior a 10^{-2} por bitio (McCULLOCH, 1960), lo cual es un indicio de que a este nivel de organización existen mecanismos integratorios de la actividad nerviosa que originan un comportamiento fiable: esto es, que tanto la población molecular como la neural contienen mecanismos que garantizan la estabilidad de la salida a despecho de perturbaciones diversas del sistema (WEISS, 1959 y 1962).

Se han ideado diferentes modelos que den cuenta de tales propiedades. Así, MATTHYSSE (1959) ha hecho ver que la mera complejidad y número de las vías químicas posibles proporciona un *amortiguador* frente a las perturbaciones sufridas por el sistema sintetizante de las macromoléculas; análogamente, al estudiar las propiedades de las redes nerviosas (o autómatas) con un montaje aleatorio, ASHBY (1950) observó que tales redes son estables con tal de que tengan un grado bastante moderado de multiplicidad de interconexiones y de que no todos los componentes sean iguales. CRAGG y TEMPERLEY (1954) han abordado la cuestión de modo algo semejante al subrayar la importancia de tener una organización no específica: construyendo un modelo cooperativo de la actividad neural (basado en la analogía que se había señalado entre el córtex y el electroimán de núcleo de hierro) advirtieron que la inespecificidad de la organización da lugar a cierto grado de inmunidad frente a lesiones y malos funcionamientos que no se halla si se usan circuitos específicos. BEURLE (1956) ha apuntado lo mismo en su estudio de la difusión de la actividad, que es de naturaleza esencialmente cooperativa en una masa de unidades conectadas al azar y que puedan regenerar los impulsos: cada unidad servía de punto común de almacenamiento de informaciones referentes a gran número de acontecimientos, y la información acerca de un suceso determinado se almacenaba en muchísimos lugares; y BEURLE decía a este respecto que este *efecto de diversidad múltiple* puede dar razón fácilmente de la equipotencialidad de ciertas zonas limitadas de la corteza (LASHLEY, 1929). A este tipo de organización parece que debe atribuírsele también la inmunidad a cierto volumen de desperfectos de los perceptrones (BLOCK, 1962).

En cierto sentido, estas propiedades integradoras se consiguen bastante fortuitamente: los modelos mismos representan el resultado de un proceso en el que se axiomatiza cuanto se puede de la estructura conocida del sistema biológico en cuestión, y luego se estudia el comportamiento subsiguiente —es esencialmente el modo de ataque del filósofo natural o científico—. Existe otra forma complementaria de atacar las cuestiones, sin embargo: es la del ingeniero, que consiste en axiomatizar o especificar el comportamiento e intentar luego el proyecto o la construcción de unas

estructuras que lo ejecuten (UTTLEY, 1961). MCCULLOCH y PITTS (1943), WIENER (1948) y VON NEUMANN (1951), en sus estudios sobre cibernética y teoría de autómatas, iniciaron el ataque al problema de la integración biológica con los métodos del ingeniero. Este problema, que ahora se formula como el de construir o proyectar autómatas fiables a partir de componentes de baja fiabilidad, ha sido muy estudiado en los últimos años, y uno de los primeros resultados fue obtenido por VON NEUMANN (1956), quien hizo ver que es posible valerse de autómatas *redundantes* (esto es, que encierran muchos más componentes y conexiones que los absolutamente imprescindibles para ejecutar el proceso que sea) para llevar a cabo ciertos cálculos (de toma de decisiones lógicas y de codificación) con cuotas de error muy inferiores a las correspondientes a los componentes empleados. Esta propiedad proviene de usar, en vez de componentes simples, agregados redundantes de componentes iguales que funcionen bajo una señal repetida —apoyándose en un principio de *lógica mayoritaria* ("lo que te diga tres veces es verdad")— con objeto de lograr una salida sin errores. En realidad, la organización de estos agregados era mucho más específica que la de los sistemas inespecíficos de que hemos hablado más arriba, y consistía en muchos circuitos repetidos con cierto grado (pequeño) de interacción mutua, en cuyas interconexiones sólo se toleraba cierto volumen de aleatoriedad local. La fiabilidad de semejantes autómatas aumentaba con la redundancia, pero a una velocidad bastante reducida, a saber: dados componentes con cuotas de error de 5×10^{-3} por bitio, se requerían redundancias del orden de 10.000 : 1 para conseguir cuotas de error globales de 10^{-10} por bitio. ALLANSON (1956) ha señalado que un modelo mucho más plausible de las estructuras integradoras del sistema nervioso central sería uno en el que existiesen componentes mucho más complejos, que tuviesen muchas entradas, en lugar de las pocas propias de los componentes elementales de Von Neumann: aquellos componentes complejos podrían dominar por sí mismos los errores sinápticos sin más que emplear réplicas de las sinapsis y el principio mayoritario. MUROGA (1960) y VERBEEK (1962) han hecho avanzar esta labor un paso más combinando ambas técnicas; esto es, se prevé que unos agregados redundantes de componentes complejos dominen tanto los errores sinápticos como los de cálculo (se necesitan redundancias muy inferiores a 10.000 : 1). Los modelos específicos de organización neural que se han proyectado para efectuar unos procesos dados, tales como clasificación (UTTLEY, 1954) o memorización (ROY, 1960) han utilizado o bien el principio lógico mayoritario o simples réplicas de los circuitos.

Puede verse que existen, esencialmente, dos tipos distintos de modelos de la integración biológica: el primero, que se basa en una axiomatización de las estructuras conocidas de los sistemas biológicos, lleva a modelos de estructura heterogénea y difusa, mientras que el segundo, que se apoya en una axiomatización del comportamiento exigido a los sistemas

integrados, conduce a modelos de estructura más homogénea y mejor localizada. El hecho de que estas últimas estructuras tengan un parecido muy escaso con las estructuras biológicas no tiene nada de sorprendente: la axiomatización del comportamiento no da lugar a una estructura única —en principio, muchas estructuras diferentes podrían efectuar el comportamiento deseado—. Debe notarse, asimismo, que las estructuras específicas resultan ser menos eficaces —requieren más componentes— que las inespecíficas cuando se trata de conseguir unas cuotas de error determinadas. No cabe duda de que tiene mucho interés considerar otras maneras de construir autómatas fiables que sean a la vez más eficaces y de organización más difusa.

Un avance reciente de la teoría de la información (COWAN y WINOGRAD, 1962) incluye en esencia, de hecho, ciertos métodos propios para la realización de semejantes autómatas: allí se demuestra que el teorema de la codificación con canal ruidoso (SHANNON, 1948) * puede generalizarse de modo que abarque los *cómputos* en presencia de ruido (y no sólo la comunicación), con tal de que se establezcan ciertas suposiciones; y de ello resulta que cabe construir autómatas fiables a partir de componentes de baja fiabilidad de suerte tal que se precisen redundancias mucho menores que las necesarias en las construcciones anteriores.

También se demuestra que es posible combatir asimismo los errores de interconexión; de modo que, para autómatas suficientemente grandes, tanto el comportamiento de los componentes como las interconexiones pueden ser hasta cierto punto aleatorios, sin que por ello el autómata deje de funcionar con cuotas de error sumamente reducidas.

El tipo de organización que se requiere en tales autómatas es de naturaleza difusa: cada componente ejecuta una función compuesta de muchas de las funciones que han de ser efectuadas por el autómata, y cada una de éstas se efectúa por muchos componentes distintos. El carácter difuso resultante —o diversidad múltiple de estructura y función— va unido a cuotas de error muy pequeñas del funcionamiento global de los autómatas, de modo que éstos, en realidad son: *a*) heterogéneos y no específicos en cuanto a organización funcional; *b*) no están completamente determinados en su organización estructural, y *c*) son sumamente eficaces.

Así pues, parece haber un eslabón vinculador de los modelos científico e ingenieril de los sistemas biológicos integrados; de hecho, UTTLEY

* Hablando sin precisión, puede enunciarse este conocido teorema del siguiente modo: valiéndose de un código apropiado, es posible transmitir mensajes suficientemente largos por un canal (línea de comunicación) con ruido a velocidad de transmisión inferior —pero todo lo cercana que se quiera— a C/i letras (del alfabeto en que estén escritos los mensajes) por unidad de tiempo (siendo C la *capacidad* del canal o cantidad de información transmisible por él en ausencia de ruido e i la cantidad de información media aportada por una letra cualquiera), y ello de forma que la probabilidad por letra transmitida de que exista un error en la recepción (esto es, de que, debido al ruido, se la confunda con otra) sea inferior a una cantidad prefijada todo lo pequeña que se quiera. *(N. del T.)*

(1954 *et seq.*) ha mostrado que en una retícula * inespecífica o conectada aleatoriamente podrían formarse fortuitamente varias réplicas de circuitos específicos, con lo que ofrece un apoyo para un enlace indirecto entre los dos géneros de modelos; y si es posible demostrar la existencia de un vínculo directo entre ambas clases de modelos, el ataque a los problemas de la integración biológica con los métodos del ingeniero adquiere, *a fortiori,* mayor significado. Tenemos la intención de hacer patente tal eslabón y de aplicar la teoría estadística de la tramitación de la información en autómatas a la construcción de modelos concretos de sistemas biológicos tales como la corteza cerebral y ciertos complejos macromoleculares.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido sufragado, en parte, por el U. S. Army Signal Corps, la Air Force Office of Scientific Research y la Office of Naval Research y, en parte, por la U. S. Air Force (Aeronautical Systems Division), bajo el contrato AF33(616)-8783.

RESUMEN

Hemos debatido la necesidad de usar una lógica polivalente y (o) la teoría de la información en el caso en que *partamos* de unidades ruidosas y conexiones asimismo ruidosas. Hemos hecho ver que pueden construirse computadoras redundantes que presenten frecuencias de error arbitrariamente pequeñas (aparte de los errores de la salida total) y que no sean enteramente redundantes, de manera que tramiten una proporción finita de la información [que les entre]; esto depende críticamente del comportamiento, en cuanto a errores, de los componentes en función de su complejidad: si los errores de los componentes aumentan con ésta, sólo puede conseguirse la fiabilidad disminuyendo la proporción de la información que tramite la computadora (no obstante lo cual, cabe hacer máxima tal proporción para unos componentes y códigos dados). Otro resultado de importancia es que semejante computadora no requiere conexiones precisas e incluso, en realidad, puede tolerarse una proporción (acotada) de errores de conexión. Hemos sometido a consideración cómo podrían aplicarse estos resultados a la construcción de modelos matemáticos de la estructura cortical.

* Aquí y en otros muchos lugares de esta obra traducimos *network* por «retícula», para distinguir aquel término de *circuit* y de *net,* pero sin hacer con ello alusión implícita alguna al llamado «sistema reticular» ni a la hace largo tiempo fenecida teoría reticular del sistema nervioso. *(N. del T.)*

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALLANSON, J. T. (1956): The reliability of neurons. *Proceedings 1st International Congress on Cybernetics, Namur,* 687-694.

ASHBY, W. R. (1950): The stability of a randomly assembled nerve-network. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 2,* 471-482.

BEURLE, R. L. (1956): Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses. *Philosophical Transactions, B, 240,* 55-95.

BLOCK, H. D. (1962): The perceptron: a model for brain function, I. *Reviews of Modern Physics, 34,* 123-135.

COWAN, J. D., y WINOGRAD, S. (1962): Trabajo enviado para su publicación en *Philosophical Transactions.*

CRAGG, B. G., y TEMPERLEY, H. N. V. (1954): The organisation of neurons: a co-operative analogy. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 6,* 85-92.

LASHLEY, K. S. (1929): *Brain Mechanism and Intelligence, a Quantitative Study of Injuries to the Brain.* Chicago, University of Chicago Press.

MATTHYSSE, S. W. (1959): *Thesis,* Princeton, Princeton University Press.

MCCULLOCH, W. S. (1960): The reliability of biological systems. *Selforganizing Systems,* ed. de M. C. Yovits y S. Cameron. London, Pergamon Press.

MCCULLOCH, W. S., y PITTS, W. (1943): A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 5,* 115-133.

MUROGA, S. (1960): *Rome Air Development Center.* Technical Note 60-146.

PAULING, L. (1960): *Errors in Protein Synthesis.* Festschrift für A. Stoll. Berlín, Springer.

QUASTLER, H. (1957): The complexity of biological computers. *IRE Trans. EC-6, 3,* 191-194.

ROY, A. E. (1960): On the storage of information in the brain. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 22,* 139-168.

SHANNON, C. E. (1948): Mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27,* 379-423; 623-658.

UTTLEY, A. M. (1961): *Progress in Biophysics, II.* Londres, Pergamon Press.

UTTLEY, A. M. (1954): The classification of signals in the nervous system. *Electro encephalography and Clinical Neurophysiology, 6,* 479-494.

VERBEEK, L. A. M. (1962): On error minimizing neuronal networks. *Symposium on Principles of Self Organization.* Londres, Pergamon Press (pp. 121-133).

VERVEEN, A. A. (1960): On the fluctuation of the threshold of the nerve fibre. *Structure and Function of the Cerebral Cortex,* ed. de D. B. Tower y J. P. Schadé. Amsterdam, Elsevier (p. 282).

VON NEUMANN, J. (1951): The general and logical theory of automata. *Cerebral Mechanism in Behavior,* ed. de L. A. Jeffress. The Hixon Symposium. Nueva York, Wiley (p. 1).

VON NEUMANN, J. (1956): Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. *Automata Studies,* ed. de C. E. Shannon y J. McCarthy. Princeton, Princeton University Press (p. 43).

WEISS, P. (1959): *Quotation,* ed. de R. Gerard. Symposium on Concepts of Biology. Nueva York, National Academy of Sciences.

WEISS, P. (1962): From cell to molecule. *Symposium on Molecular Control of Cellular Activity.* Nueva York, Wiley.

WIENER, N. (1948): *Cybernetics.* Nueva York, Wiley.

DISCUSION

WIENER.—Hay aquí varias cosas que me han interesado mucho. En primer lugar, el álgebra de la lógica, el *sí o no* del sistema nervioso: visto superficialmente, parece que el estadio más simple de la actividad nerviosa ha de ser de *sí o no;* pero no necesita ser así. Cuando nos encontramos con la ley del todo o nada en el sistema nervioso, como suele concederse en el caso de que una descarga en aguja se propague o desaparezca —únicas alternativas que, por lo general, se admiten como posibles—, se trata de una representación que no hace justicia a lo que sucede: es preciso que la descarga recorra cierta distancia por la neurona para que llegue a adoptar una forma estable o a desaparecer; y, con respecto a la neurona individual, estos son fenómenos que duran un tiempo. La importancia de todo esto es que el elemento —la acción elemental —de la neurona no entra en las acciones regidas por el álgebra de la lógica que aquí se han dado por supuestas, sino que es mucho más complicada; y en las fibras cortas del cerebro es, al menos, sumamente discutible que los recorridos sean suficientemente largos como para dar origen a un *sí* o un *no* tan definidos. Dicho de otro modo: cuando descendemos a la máquina elemental del sistema nervioso, el grado de complejidad de éste no está dado simplemente por el número de neuronas, sino por el de estadios de actividad de cada neurona, que es muchísimo mayor que aquél; y esto puede ser muy importante.

La otra cosa de que quiero hablar son las repercusiones sobre la mecánica estadística. También yo estoy absolutamente convencido de que esta labor se encuentra unida muy estrechamente a los estudios generales de mecánica estadística; y a este respecto habrá que tener en cuenta cambios no lineales en la neurona (que no tiene por qué ser de índole de *sí o no,* la cual también en este caso es resultado de una simplificación). Este tipo de estudios será necesario, sobre todo, para fuerzas a larga distancia, por ejemplo, con plasmas. Actualmente estoy trabajando en una forma de mecánica estadística apropiada para ello; y lo que nos afecta en esta ocasión es que el modelo que empleo no se apoya en partículas discretas, sino en un continuo en el que el número de grados de libertad se mantiene finito en forma efectiva; pero no porque existan partículas individuales, sino en virtud de ciertas limitaciones impuestas al análisis armónico del espacio. Me parece que este género de trabajos va a ser útil también para el estudio de las redes nerviosas; es decir, creo que aquí necesitamos una teoría completa de funciones aleatorias, y que aunque el atomismo puro contituye, tanto en neurología como en la física de corpúsculos, un modo de ataque que posee mucha validez

y que no podemos permitirnos dejar de lado completamente, existen otras formalizaciones que pueden ser igualmente útiles, o incluso más, en muchos casos.

TEN HOOPEN.—Verdaderamente, el aspecto matemático de esas redes de neuronas formales es sumamente interesante; sin embargo, la última frase del resumen ("la intención de someter a consideración cómo podrían aplicarse estos resultados a la construcción de modelos matemáticos de la estructura cortical") me preocupa. ¿Se refiere usted a lo que dijo antes acerca de las conjeturas de PAUL WEISS? Pregunto esto teniendo en cuenta lo que ha subrayado el doctor MCCULLOCH, o sea que está usted utilizando neuronas idealizadas, formales. ¿Podría decirnos algo acerca de la relación entre estas neuronas y las que realmente encontramos en el córtex?

COWAN.—Dentro de nuestro propio grupo, el doctor LETTVIN ha sostenido que es ilógico que se pretenda aplicar la teoría de autómatas a las redes nerviosas; aduce como argumento que existen unidades que poseen hasta 100.000 entradas y una salida ramificada múltiplemente, que la geometría de las unidades tiene una importancia decisiva y que en el sistema nervioso puede haber hasta 10.000 tipos de unidades diferentes; y agrega que en el interior de una de ellas se encuentran todos los tipos de cambios lentos de potencial, de modo que, en realidad, no sería posible hablar de ella como de un autómata. Con todo, en último análisis, semejante unidad, con sus 100.000 entradas discretas y su una salida, es un autómata finito; sea lo que sea lo que pase en su interior —es decir, la clase de cambios lentos de potencial que se produzcan—, tenemos una entrada constituida por impulsos discretos. Es cierto que éstos se transducen en todo género de potenciales lentos y, por tanto, que tienen lugar todo género de efectos electroquímicos; pero, de todos modos, la salida última es de nuevo un potencial de acción que se propaga, y de la unidad surgen configuraciones de impulsos. Por consiguiente, a mí me parece que se pueden seguir aplicando a las redes nerviosas las teorías estadísticas de los autómatas. A los métodos estadísticos les falta, desde luego, mucho vigor para tales aplicaciones, y en lo casos específicos nos van a fallar (es menester introducir independientemente la especificidad pertinente); pero, sin duda alguna, semejantes teorías podrían decirnos algunas cosas más acerca del comportamiento cualitativo de una gran masa de unidades en interacción que presente un comportamiento integrado.

GEORGE.—¿Intentan de algún modo los sistemas de redes neurales de que usted se vale describir los procesos de *crecimiento*? ¿O está usted pensando en una red neural *adulta*?

COWAN.—No hemos llegado siquiera a ese grado de especificidad. En el Carnegie Institute of Technology, W. H. PIERCE ha trabajado

algo sobre sistemas adaptativos que puedan aprender a corregir sus propios errores averiguando qué entradas son menos fiables.

GEORGE.—Esos sistemas, con las conexiones ya fijadas, son incapaces de simular el crecimiento según están ahora constituidos.

COWAN.—Según están ahora constituidos lo son; pero sería muy fácil intoducir el crecimiento disponiendo de suficientes unidades complejas.

GEORGE.—Se me ocurre —quizá no demasiado seriamente— que las chicas que montan los circuitos a los que usted adscribe una función de probabilidad de errores representan el proceso de crecimiento de la máquina. Y si se las reemplazase por máquinas, las constantes de la de usted podrían tener verdadero interés.

BOK.—Me gustaría hacer una pregunta. En el sistema que usted estudia introduce usted algo, saca algo, y piensa que hay ciertas leyes que median entre la entrada y la salida. ¿Por qué no se ocupa sólo de la entrada y la utiliza para plantear la cuestión de cuál es la función del sistema nervioso?

COWAN.—Probablemente hubiese dicho, desde el primer momento, que tal análisis es realmente secundario, puesto que entonces está uno dando por supuesto que sabe ya lo que quiere hacer: que tiene uno un plano de una máquina ideal. Hay preguntas mucho más importantes, que se refieren a la posibilidad de hacer realmente un duplicado de los componentes naturales con que contamos y a la de descubrir realmente qué es lo que hace el sistema aleatorio; pero eso no es lo que hemos intentado aquí.

RASHEVSKI.—Me gustaría hacer unas pocas observaciones. Es posible que la naturaleza actúe en cierto modo como probablemente lo haría un ingeniero, sin intentar dar una explicación de cómo y por qué sucede todo; al fin y al cabo, en física aceptamos postulados y principios que no podemos ni representarnos imaginativamente ni explicar: la luz es tanto onda como partícula, cosa que ha causado muchos dolores de cabeza al físico hace unos treinta y cinco años, mientras que ahora aceptamos simplemente tal idea y no la analizamos más. Acaso tengamos que aceptar que el cerebro ha sido proyectado por un ingeniero muy listo y entendido, y que no seamos capaces de averiguar por qué aconteció así; y, por otra parte, tal vez entre aquí un principio de la evolución que permita sobrevivir al sistema mejor proyectado (en realidad, no podemos concluir que se trate de un proceso evolutivo hasta que se haya llevado a cabo una investigación matemática a fondo de otros aspectos determinados de la evolución).

HOOGENSTRAATEN.—El método que usted propone para eliminar la falta de fiabilidad de los componentes y (o) de las conexiones, y

para llegar de este modo a un conjunto fiable, ¿elimina la contradicción con que nos topamos cuando pensamos en máquinas finitas y *estrictamente causales* (provistas de infinita cinta) que respondan correctamente a proposiciones lógicas? Pues con tales máquinas ocurre que siempre puede encontrarse una proposición intuitivamente verdadera que no pueda demostrarse por la máquina, y si identificamos nuestro cerebro con semejante computadora surgiría una contradicción.

COWAN.—No estoy seguro de entender exactamente lo que ha preguntado, pero ciertos rasgos de las máquinas de la complejidad de ésta van unidos a alguna indeterminación. Supongamos que se tenga una máquina construida realmente de tal modo que domine los malos funcionamientos y "sobreviva" en un medio ruidoso; una máquina de esta índole tiene necesariamente que tener la propiedad de que toda unidad de ella se encuentre en una interacción tremenda con otras muchas, y de que cada una de sus unidades realice cosas compuestas de muchas de las que sean necesarias para la supervivencia del sistema. La descripción lógica de las relaciones entre la entrada y la salida requiere solamente la lógica booleana bivalente*, pero la de las relaciones interiores al sistema exige una lógica polivalente: sólo se pasa de la lógica polivalente a la bivalente cuando se pasa del interior del sistema a su exterior; y, en realidad, partiendo de un conocimiento de las relaciones exteriores entre la entrada y la salida no cabe inferir nada acerca del interior, de igual modo que lo que proceda de una sola neurona (esto es, algo que está en el interior) no nos dice tampoco nada acerca del sistema. Así pues, existe una incertidumbre fundamental en todo este asunto entre lo perteneciente al interior y lo del exterior.

STEWART.—Este género de teoría parece suponer que en cualquier momento existirá una proporción más o menos constante de componentes defectuosos; y así parece suponerse implícitamente que cualquier componente puede averiarse en algún momento determinado, pero que no ha de permanecer averiado. ¿Ha indagado usted lo que pasaría con la acumulación de las averías?

---

* Esto es, cierto cálculo lógico de clases interpretado como un álgebra cuyas variables puedan tomar sólo los dos valores 0 y 1. En general, por lo demás (esto es, sin la restricción interpretativa que acabamos de mencionar), las variables de esa lógica admiten una doble ley de composición (simbolizada, en los escritos de Boole, por «+» y «·», y que se suele denominar con «suma» o «unión» y «producto» o «intersección»); estas leyes son asociativas y conmutativas, así como mutuamente distributivas —frente a la no distributividad de la suma respecto del producto en el álgebra ordinaria—, y entre las variables hay un elemento neutro o módulo respecto de la suma (simbolizado por «0»); y otro respecto del producto («1»); una propiedad importante de este cálculo es la *idempotencia*, es decir, que para todo x, $x \cdot x = x$. (*N. del T.*)

COWAN.—Lo que ocurre es que si se emplean máquinas suficientemente grandes llegará a ser casi lo mismo que los componentes funcionen mal intermitentemente o que se estropeen permanentemente, con tal de que estos errores no sean catastróficos.

STEWART.—Lo que quiero decir es que si suponemos que algunas cosas se estropean y que una vez estropeadas continúan estándolo, tal vez tengamos así un modelo mejor de la manera en que ocurren las cosas en los organismos vivos.

COWAN.—Si todas las averías son permanentes y se incrementan, cada vez más es difícil hacer nada frente a ello, como no sea emplear un número creciente de componentes o utilizar, sin más, técnicas de reposición. Y para ello se necesita algún tipo de proceso de índole dinámica.

COLDACRE.—Estoy muy interesado en lo que ha dicho usted sobre la capacidad que tiene su sistema de tolerar errores en las conexiones internas, y estaba pensando en si podría darnos una estimación numérica de ella en casos concretos; por ejemplo, ¿qué tamaño tendría que tener para tolerar, digamos, el 50 % de errores en estas conexiones?, y ¿hay alguna posibilidad de tener un sistema muy grande que trabaje con conexiones enteramente aleatorias?

COWAN.—Sí la hay, pero la computadora tendría que ser indefinidamente grande, y dependería en gran medida del ruido que de hecho tuviesen los componentes.

UTTLEY.—Lo que está en cuestión no es precisamente el tamaño de la máquina, sino lo complicados que han de ser los elementos computadores.

COWAN.—Permítanme que ponga un ejemplo. Supongamos que los errores de interconexión se presentan con una probabilidad de un medio, y que disponemos de componentes que tengan una capacidad de computación de 0,9 (es decir, que debido al ruido se pierdan 0,1 bitios de información de salida); llegamos entonces al resultado siguiente: la redundancia, R, que tiene que emplearse en un autómata para poder despreciar sin riesgo los errores de conexión está dada por la desigualdad

$$R > \left(C_c - p \log \frac{1}{p}\right)^{-1}$$

siendo $C_c = 0{,}9$ y $p = 0{,}5$ (véase COWAN y WINOGRAD, 1962), con lo que obtenemos el valor $R = 2{,}5$. O sea: con tal de que 5n compo-

nentes hagan el trabajo de 2n, puede construirse un autómata, para n suficientemente grande, que funcione de modo fiable, pese a que se tengan errores de conexión con probabilidad 0,5. Así pues, un sistema suficientemente grande podría funcionar con conexiones enteramente aleatorias; sin embargo, sus componentes tendrían que ser complejísimos y computar funciones de muchísimas entradas con una capacidad de computación de 0,9, ya que de otro modo no se conseguiría dicho resultado.

La neurona como unidad síncrona

Por P. L. LATOUR

En muchas ciencias, los perfeccionamientos de los instrumentos han demostrado ser muy útiles. En el campo de la electrónica médica hay muchos fenómenos que se han descubierto gracias a correlacionadoras, promediadoras, máquinas de reconocimiento de configuraciones, etc.; y cuando se emplean dispositivos temporizadores de precisión para medir los tiempos de reacción del ojo a los estímulos visuales cabe descubrir una estructura fina de tales tiempos (dicho sucintamente, lo que se encuentra es que parecen existir ciertos momentos, a intervalos constantes, por los que el comienzo del movimiento ocular tiene preferencia).

El período que sale a luz en tales experimentos está relacionado tanto con el ritmo α del sujeto en reposo como con la respuesta "suscitada" media durante el tiempo en que esté sometido a las pruebas. Datos que parecen apuntar a cierto tipo de reloj interno que los estímulos pondrían a cero con facilidad.

En un intento de penetrar de algún modo en los mecanismos que subyagan aquí, hemos estudiado retículas neurales formadas por neuronas idealizadas del tipo de McCulloch-Pitts, que presentan un umbral medido en unidades de excitación y se disparan, tras una demora sináptica, si la suma de los impulsos excitadores e inhibidores es igual o superior al valor del umbral; hemos supuesto, además, que en el circuito no se producen demoras.

Valiéndonos de estas neuronas podemos construir dispositivos sincronizados que pretendan simular las retículas neurales reales. Para nuestro modelo elegimos las variables booleanas *a, b, c, ...*, que podrán adoptar los valores 0 y 1.

Vamos a representar ahora las condiciones en que se disparan las neuronas valiéndonos de estas variables. Consideremos, para ello, la neurona

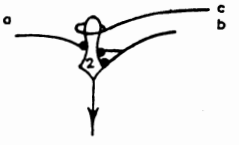


Fig. 1. (Véase la explicación del texto.)

de la figura 1, cuyo umbral valga 2: si, por ejemplo, se activa la entrada *b*, la neurona se dispara, y lo mismo ocurre si se activan *a* y *b*; y [en general] podemos formar una tabla "veritativa" para esta neurona, que nos indique las condiciones bajo las que se disparará:

a	b	c	ds
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Escritas con las variables booleanas, estas condiciones de disparo son las siguientes:

$$ds = \bar{a}b\bar{c} + ab\bar{c} + abc \text{ , siendo } \bar{k} = 1 - k$$

Supongamos que tenemos una retícula que contenga varias neuronas. En el instante $t = 0$ se presenta una configuración de disparos, y tras la demora sináptica δ encontramos la configuración de disparos siguiente, que estará originada por la correspondiente a $t = 0$; la sucesión de configuraciones estará dada por la lógica interna del circuito, o sea —por expresarlo de un modo distinto—, en virtud de la fórmula de transformación de las condiciones de disparo de las neuronas, que son, en general, las siguientes:

$$\begin{aligned} x_1' &= \varphi_1 (x_i) \\ x_n' &= \varphi_n (x_i) \end{aligned} \qquad (1)$$

en las que $x_i = 1$ si la i-ésima neurona se dispara en el instante $t = T$, $x_i = 0$ si no se dispara en este instante, $x'_i = 1$ si la i-ésima neurona se dispara en el instante $t = T + \delta$, y $x'_i = 0$ si no lo hace.

Nos interesa mucho el comportamiento del circuito conforme pase el tiempo. En el caso especial de que las ecuaciones (1) sean lineales en x_i, se puede hallar fácilmente una solución general del comportamiento futuro del circuito. Fijémonos, por ejemplo, en el conjunto dado por

$$\begin{aligned} x_1' &= x_2 \\ x_2' &= x_3 \\ x_3' &= x_1 \end{aligned}$$

Se trata de un circuito muy simple: si cuando $t = 0$ se dispara la primera neurona, cuando sea $t = \delta$ se disparará la segunda, cuando $t = 2\delta$ lo hará

la tercera, y en el instante $t = 3\delta$ volverá a hacerlo la primera; y cabe escribir las ecuaciones de este ejemplo del modo siguiente:

$$\{x_i\}' = M\{x_i\} \text{ siendo } M = \begin{pmatrix} 010 \\ 001 \\ 100 \end{pmatrix}$$

Así pues, dada la configuración de disparos en el momento $t = 0$, podemos hallar directamente la correspondiente a $t = n\delta$ haciendo

$$\{x_i\}^n = M^n\{x_i\} = M^{n-3k}\{x_i\} \text{ ya que } M^3 = E *$$

(Naturalmente, no es una coincidencia que tanto el circuito como la matriz M tengan de período tres.)

No es posible resolver de este modo el caso general, ya que no cabe representar un sistema no lineal por una matriz de este tipo; para encontrar la solución general tenemos que avanzar por otro camino. Si hay n neuronas, tendremos 2^n configuraciones de disparo distintas, que podremos denotar mediante números escritos en sistema binario, desde (000 ... 00) hasta (111 ... 11) —desde no dispararse ninguna neurona a hacerlo todas—. La lógica del circuito determinará la sucesión de configuraciones, y vamos a llamar diagrama de estado de la retícula al grafo completo ** de todas las configuraciones con sus sucesiones respectivas.

Podemos transformar, de acuerdo con ciertas reglas, nuestra fórmula anterior acerca de las condiciones de disparo de cada neurona en relación con las demás, para llegar a las condiciones de disparo de todas las configuraciones de disparo posibles. Obtenemos así, en general, un conjunto de 2^n ecuaciones de la forma

$$(x_1x_2x_3 \ldots x_n)' = \varphi_1(x_1x_2 \ldots x_n, \bar{x}_1x_2 \ldots x_n, \ldots, \bar{x}_1\bar{x}_2 \ldots \bar{x}_n)$$
$$(\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 \ldots \bar{x}_n)' = \varphi_{2^n}(x_1x_2 \ldots x_n, \bar{x}_1x_2 \ldots x_n, \ldots, \bar{x}_1\bar{x}_2 \ldots \bar{x}_n)$$

ecuaciones que son lineales en las nuevas variables, ya que constituyen, justamente, la expresión canónica de estas funciones booleanas ***.

---

* E es, evidentemente, el elemento neutro para el producto del anillo de las matrices cuadradas (de tercer orden), o sea, la llamada matriz unida, $\begin{pmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \end{pmatrix}$, que también es frecuente designar con I. *(N. del T.)*

** Recuérdese que suele darse el nombre de *grafo* a todo diagrama formado por puntos *(nodos* o *cimas)* —representativos de magnitudes, estados, transformaciones, etc.— unidos por flechas o líneas *(arcos);* más abstractamente, se habla de un grafo cuando se tiene un conjunto de puntos y una aplicación de dicho conjunto en sí mismo. Se dice que un grafo es completo cuando todo par de puntos está unido, al menos, en un sentido. *(N. del T.)*

*** La expresión canónica de una función booleana se forma efectuando la suma (booleana) de los «minitérminos» (= producto —booleano— de las variables que tomen el valor 1 por los complementos de las que tomen el valor 0) correspondientes a cada uno de los estados del sistema para los que la función tenga el valor 1. *(N. del T.)*

Vamos a aclarar el procedimiento que se sigue en el caso no lineal con un ejemplo. Consideremos el conjunto

$$x_1' = 1 - x_1$$
$$x_2' = 1 - x_1 - x_2 + 2x_1x_2$$
$$x_3' = 1 - x_1 - x_2 - x_3 + x_1x_2 + 2x_1x_3 + 2x_2x_3 - 2x_1x_2x_3$$

Si transformamos este conjunto de ecuaciones en el espacio canónico, llegamos a la siguiente transformación:

$$(x_1x_2x_3)' = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 \qquad (x_1x_2\bar{x}_3)' = \bar{x}_1\bar{x}_2x_3$$
$$(\bar{x}_1x_2x_3)' = x_1x_2x_3 \qquad (\bar{x}_1x_2\bar{x}_3)' = x_1x_2\bar{x}_3$$
$$(x_1\bar{x}_2x_3)' = \bar{x}_1x_2x_3 \qquad (x_1\bar{x}_2\bar{x}_3)' = \bar{x}_1x_2\bar{x}_3$$
$$(\bar{x}_1\bar{x}_2x_3)' = x_1\bar{x}_2x_3 \qquad (\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3)' = x_1\bar{x}_2\bar{x}_3$$

cuya matriz está dada por:

$$M = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix}$$

La ecuación característica de esta transformación es $|M - \lambda| = (1 - \lambda^8)$.

Al representar el diagrama de estado de este circuito llegamos a:

$$x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 \to \bar{x}_1x_2\bar{x}_3 \to x_1x_2\bar{x}_3 \to \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 \to x_1\bar{x}_2x_3 \to \bar{x}_1x_2x_3 \to x_1x_2x_3 \to \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3$$

de modo que tiene un período igual a 8, que es el exponente λ en la ecuación característica. (Adviértase que en este caso no hay linealidad: si no se dispara ninguna neurona en el instante $t = 0$, al llegar $t = \delta$ se dispararán todas.)

En general, cabe demostrar que, supuesto que una matriz de este tipo de transformaciones tenga una ecuación característica de la forma

$$|M - \lambda| = \lambda^{\alpha_0} \Pi_{a_i} (1 - \lambda^{\alpha_i})$$

tenemos en este caso, y sólo en él, unos circuitos con período α_i, y α_0 estados no periódicos; y asimismo el teorema inverso. Por ejemplo, un diagrama de estado como el de la figura 2 tiene una ecuación característica de la forma $\lambda^3 (1 - \lambda^3)(1 - \lambda^2)$.

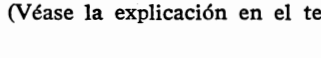


Fig. 2. (Véase la explicación en el texto.)

DEMOSTRACION DEL TEOREMA

Advertimos, por ejemplo, en primer lugar, que todos los estados de un circuito, que interpretamos como vectores en un espacio de 2^n dimensiones, son independientes.

Supongamos ahora que el circuito que estemos considerando (cuya matriz será M) posea ciertos grupos de estados cíclicos, y sean p, q, r, ..., los períodos de tales ciclos. El primer ciclo constará de p elementos o estados, $P_1 \ldots P_p$, con

$$M P_i = P_{i+1}; \; M P_p = P_1$$

El subespacio definido por los vectores $P_1 \ldots P_p$ es invariante con respecto a las transformaciones efectuadas mediante M, y en él tenemos una base de autovectores, e_i, que tienen ciertos autovalores, λ_i. Con respecto al conjunto P_i podemos escribir: $P_1 = \Sigma a_i \cdot e_i$; aplicamos ahora M y tenemos: $P_2 = \Sigma a_i \lambda_i \cdot e_i$, y repitiendo este proceso llegamos a: $P_p = \Sigma a_i \lambda_i^{p-1} \cdot e_i \ldots A$.

Lo primero que ha de notarse es que, para todo i, $a_i \neq 0$, pues en caso contrario este espacio p-dimensional podría engendrarse por sólo parte de la base.

Asimismo se cumple la relación

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_p \\ \lambda_1^{p-1} & \lambda_2^{p-1} & \lambda_3^{p-1} & \lambda_p^{p-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & & & \\ & a_2 & & \\ & & a_3 & \\ & & & a_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_p \\ \lambda_1 a_1 & \lambda_2 a_2 & \lambda_p a_p \\ \lambda_1^{p-1} a_1 & \lambda_2^{p-1} a_2 & \lambda_p^{p-1} a_p \end{pmatrix}$$

Pero la matriz del segundo miembro consiste en los p elementos independientes P_i, y por ello su determinante tiene que ser distinto de cero; además, el determinante de las a_i es también distinto de cero, por ser $a_i \neq 0$, luego el de la primera matriz tiene que ser asimismo distinto de cero; por consiguiente, $\lambda_i \neq \lambda_j$ (para $i \neq j$).

Escribiendo de nuevo $P_1 = \Sigma a_i e_i$ y aplicando p veces M llegamos a $P_1 = \Sigma a_i \lambda^p e_i$, o sea a $(\lambda^p - 1) = 0$, ecuación que tiene p raíces (y, según hemos visto antes, las necesitamos todas).

Así pues, para este subespacio la ecuación característica viene dada por

$$(\lambda^p - 1) = 0$$

Aplicamos igual proceso a los demás subespacios de M, y llegamos al siguiente polinomio, característico de los subespacios cíclicos:

$$\Pi_{a_i} (1 - \lambda^{a_i}) = 0 \quad a_i = p, q, r, \ldots$$

Consideremos, finalmente, el subespacio de M constituido por los estados que no se hallen en sucesión cíclica: en él todos los autovalores tie-

nen que ser cero, ya que de otro modo una parte de él tendría que ser invariante. El polinomio característico se convierte así en:

$$| M - \lambda | = \pm \lambda^{a_0} \Pi_{a_i} (1 - \lambda^{a_i}) \text{ con } \Sigma a_i = 2^n$$

Por otra parte, partiendo de que M tenga un polinomio característico de la forma

$$\lambda^{a_0} \Pi_{a_i} (1 - \lambda^{a_i}) = 0$$

es evidente: 1) que los subespacios definidos por las raíces de λ en

$$(1 - \lambda^{a_i}) = 0$$

son invariantes, y 2) que para todo vector de cada uno de estos subespacios se cumple la relación

$$M^{a_i} (V) = V,$$

en tanto que

$$M^{b_i} (V) \neq V \text{ para } (a_i, b_i) \neq a_i$$

Con objeto de ejemplificar este enfoque, veamos el siguiente problema. Queremos proyectar un dispositivo que posea las siguientes propiedades: si la señal de entrada es cero, no debe haber señal de salida correspondiente; si en la entrada tenemos un impulso, hemos de tener un impulso en la salida *C*, y si lo que entra es una sucesión de impulsos cualquiera pero mayor que uno, ha de salir una sucesión de impulsos por la salida *F*.

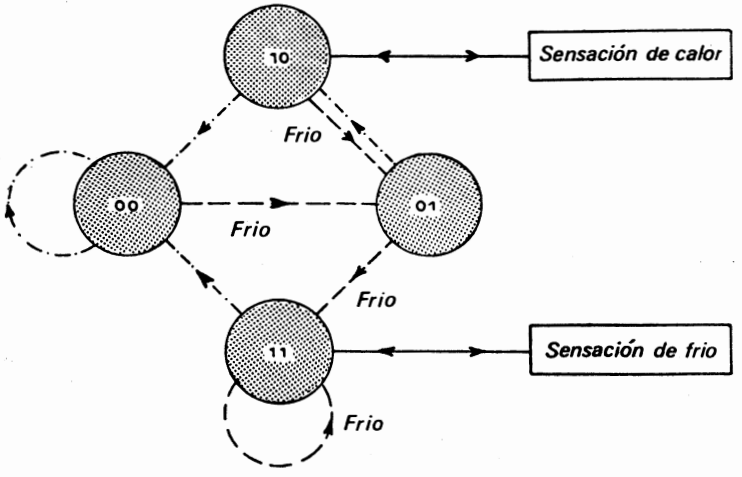


Fig. 3. Diagrama de estado de un dispositivo sensible a la temperatura dotado de las propiedades que se especifican en el texto.

Como puede comprenderse por sus propiedades, se trata de un dispositivo sensible a la temperatura que proporciona una sensación equivocada cuando se aplica un estímulo frío durante un tiempo demasiado breve.

Para el proyecto de este dispositivo empleamos directamente el diagrama de estado tal y como viene dado por sus propiedades. En reposo, el sistema se encuentra en el estado (00); si entra un impulso se pasa del estado (00) al (01); si no aparece otro impulso en el intervalo temporal siguiente, el apartado pasa al estado (10), que es diacrítico [*critical*] para la —equivocada— percepción de calor, y desde el (10) el sistema vuelve al estado (00) si no se presenta nigún otro impulso.

Pero si, por el contrario, se introducen en el dispositivo dos o más impulsos, pasará al estado (11) tras atravesar el (01), y el estado (11) es diacrítico para la percepción de frío. Cuando acabe la sucesión de impulsos, el aparato pasará directamente del estado (11) al (00).

El proyecto de este dispositivo valiéndose de un diagrama de estado ha sido enormemente sencillo y directo: a partir de tal diagrama podemos extraer la fórmula de transformación correspondiente a las neuronas que ha de tener, y una vez llegados a tal punto hemos de idear el modo de realizar dicha fórmula con la lógica neural.

En este caso, que es bastante simple, podemos encontrar lo que considero ser la solución más sencilla posible.

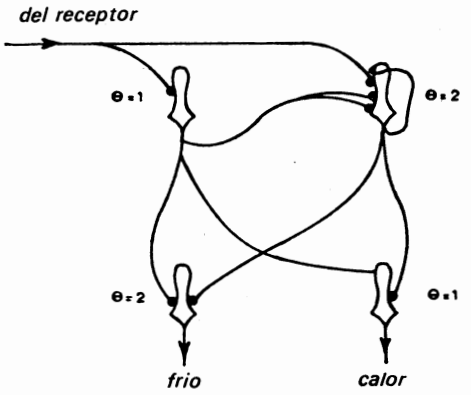


Fig. 4. Retícula neural que satisface las condiciones del diagrama de estado de la figura 5.

Puede verse en la figura 4 que la lógica [del sistema] se ha concentrado en sólo dos neuronas, en tanto que las otras dos son necesarias para acoplar los dos estados diacríticos, (10) y (11), a los elementos que perciben la temperatura.

Cuando volvemos a considerar el análisis de retículas dotadas de neuronas ideales a la luz de la realidad, tenemos la sensación de que por

alguna parte se nos ha escapado la verdad; pues, en realidad, pueden oponerse muchas objeciones graves al estudio del cerebro, o de sus partes, como un dispositivo lógico síncrono.

Es de esperar, sin embargo, que las relaciones y propiedades que hemos esbozado se conserven en un sentido estadístico: cuando consideramos el sistema no como un aparato síncrono y autónomo, sino como uno dotado de umbrales fluctuantes, gran cantidad de entradas de ruido y muchos artefactos sobre los que todavía no sabemos nada, es posible que algunas de las observaciones que hemos hecho sigan siendo coherentes. Cabe imaginar que la totalidad de la población de las neuronas en reposo —en el sentido de que no habría entradas no triviales— pueda representarse por un diagrama de estado estadístico, de origen cíclico, cuyo período esté determinado por las propiedades globales de las neuronas correspondientes; una vez que en este "caos rítmico" entre una señal —ya sea un destello luminoso, un chasquido o una idea—, el sistema pasará estadísticamente a un nuevo estado, que dependerá del momento en que se haya producido la entrada, de esta misma y del estado del sistema; y desde el nuevo estado el sistema encontrará la manera de retornar al conjunto cíclico estadístico.

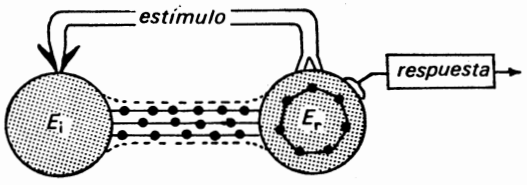


Fig. 5. Cuando no hay entradas, el cerebro se encuentra en una sucesión cíclica de estados, E_r, cada uno de los cuales facilita o inhibe una respuesta específica. Cuando se aplica un estímulo, el sistema pasa a un nuevo conjunto de estados, E_i, que llevan otra vez, a través de diversos estados intermedios, al conjunto cíclico E_r.

Volvamos ahora a los experimentos.

Se ha demostrado que en el instante mismo en que el ojo comienza a moverse se eleva el umbral de la percepción visual. En un experimento de esta índole algo ampliado hemos lanzado un destello de 20 μseg y cuya intensidad era de 3 unidades logarítmicas por encima del umbral a un ojo que estaba a punto de moverse, que se estaba moviendo y que acababa justamente de moverse, y hemos trazado una curva representativa de las eventualidades de percepción en el tiempo con respecto al instante de comienzo del movimiento ocular (fig. 6).

Lo más notable de esta curva es que el umbral se eleva antes de que el ojo comience a moverse; así pues, el cerebro sabe anticipadamente del movimiento, y es la ciega mente la que permite que el ojo se mueva. Pero hay otro punto aún más notable: existe otro período de relativa ceguera,

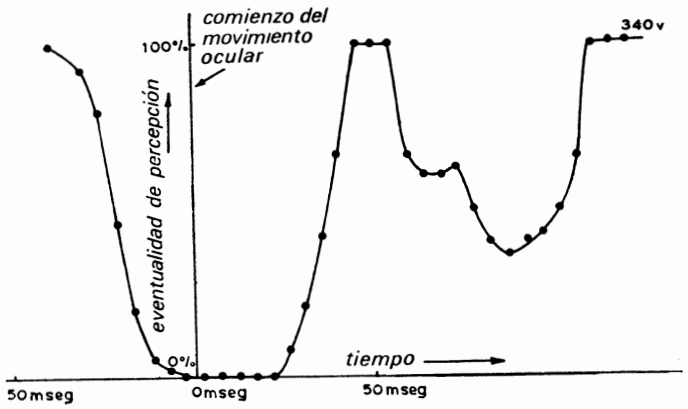


Fig. 6. Las eventualidades de percepción de un destello de corta duración en relación con el momento en que se presente con respecto al instante de comienzo del movimiento ocular.

que sigue al movimiento ocular; durante este intervalo el ojo no se movía, pero creemos que si hubiera de producirse un nuevo movimiento ocular, hubiese tenido lugar en este período, y que si hubiéramos ampliado el tiempo abarcado por nuestras mediciones podríamos haber encontrado más de dos caídas —de hecho, toda una serie de lagunas de la percepción visual—. No necesito acentuar la semejanza de este punto con la estructura fina del tiempo de reacción, las propiedades del modelo y las configuraciones periódicas del EEG.

Todos estos testimonios apuntan a cierto tipo de reloj interno que programa cuidadosamente nuestras actividades motoras.

RESUMEN

Hemos investigado, por medio de métodos matemáticos análogos a los de la teoría de retículas secuenciales lineales, el comportamiento secuencial de un conjunto de neuronas idealizadas. Suponiendo que este enfoque sea válido para representar los acontecimientos corticales, es sumamente fácil explicar las periodicidades que se encuentran en los experimentos sobre tiempos de reacción.

Los autómatas finitos y el sistema nervioso

Por F. H. GEORGE

I. INTRODUCCION

Con el presente trabajo esperamos someter a prueba y estimular la labor realizada desde el punto de vista *conceptual* encaminada a construir un modelo del sistema nervioso humano.

La cibernética se ocupa de construir modelos de todas clases, y no meramente los que simulen, del modo que sea, el comportamiento humano; pero en esta comunicación no sólo nos vamos a confinar a la simulación de tal comportamiento, sino, de un modo aún más restringido, a la de la actividad de ciertos aspectos del sistema nervioso del hombre.

Ello presenta ciertas dificultades, debido a la forma, tan interconectada, en que uno sospecha que marcha el cerebro —y lo mismo podemos decir de la totalidad del comportamiento humano—. De lo que quiero hablar es del *pensar humano* y de la manera en que pueda funcionar el sistema nervioso para que sea posible; pero ello presupone muchas cosas acerca de la percepción y de otras características del funcionamiento del cerebro en que no quiero entrar, pese a ser, innegablemente, pertinentes al respecto. Tengo la intención, además, de apelar a los testimonios neurofisiológicos, aun cuando no pretendo poseer en este campo conocimientos de experto; lo cual, desde luego, le coloca a uno al descubierto ante la obvia crítica de ser un aficionado, y frente a ella no puedo presentar otra excusa sino la de que, desde el punto de vista cibernético, los sistemas nerviosos reales y los conceptuales no son, en realidad, muy diferentes. Con esto quiero decir, naturalmente, que cuando los neurofisiólogos nos dicen cómo creen que el sistema nervioso funciona de la manera en que lo hace, están describiendo, en realidad, un sistema nervioso conceptual; y la ventaja que tiene el empezar por el otro extremo del proceso (el conceptual) consiste en que *el modelo que así se describe es susceptible de ser sometido a contraste con precisión.* Es enteramente obvio que con esto no pretendo decir implícitamente que carezcan de importancia los estudios empíricos de sistemas nerviosos reales: como es natural, constituyen la sola base en que se apoya toda esta cuestión; pero tales estudios no repre-

sentan el único modo posible de ataque en el intento por comprender el cerebro.

Hemos de atender, en primer lugar, a nuestro *método* de construcción de modelos. Es muy natural que, de todas las clases de autómatas que se han propuesto, tomemos solamente en consideración los que reciben el nombre de redes lógicas —o de redes neurales, según les hemos de llamar en este trabajo—. Dicho brevemente, se trata de colecciones de células representadas esquemáticamente por círculos (representativos de las células nerviosas) y unidas entre sí por líneas (representativas de las fibras nerviosas); y las fibras tienen dos tipos distintos de terminales en contacto con las células, los excitadores y los inhibidores (que en nuestros diagramas están representados, respectivamente, por triángulos llenos y por circulitos; STEWART, 1959); dentro de cada círculo aparece un número (un entero real), que es el *número del umbral* de la célula correspondiente, e indica simplemente cuál tiene que ser el balance total de todas las entradas excitadoras *en actividad* y todas las inhibidoras *en actividad* en un momento cualquiera para que, debido a él, aquella célula se dispare. (Las palabras "se dispare" significan "haga que su salida se ponga en actividad en el instante temporal siguiente".)

Suponemos que todo montaje de células del tipo indicado trabaja temporizadamente, de modo que el dispararse llevará en cualquier célula un instante y el impulso recorrerá las fibras instantáneamente. En la figura 1 puede verse un montaje o circuito sencillo, en el que se pueden observar las convenciones mencionadas (GEORGE, 1961). Las cosas más obvias que cabe decir acerca de semejantes modelos son: 1) que se pueden construir con materiales reales, utilizando casi cualquier sistema de conmutación;

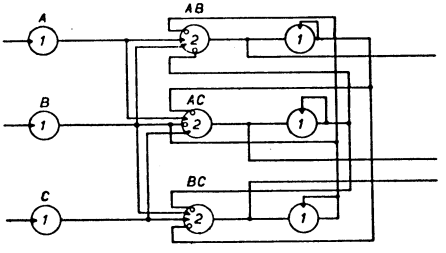


Fig. 1. Circuito neural sencillo, en el que se hace visible un método para lograr una autoclasificación parcial.

2) que pueden simularse mediante una computadora digital de uso general; 3) que tiene una representación matemático-lógica precisa, y —lo más importante de todo— 4) que, pese a su obvio parecido con los nervios del sistema nervioso humano, no son exactamente iguales a ellos.

Por lo tanto, preguntémonos en qué difieren de las propiedades que conocemos de los sistemas nerviosos reales.

1. En la práctica se encuentran grandes variaciones en lo que se refiere al período refractario de las células nerviosas, mientras que en nuestras redes no hacemos distinción alguna al respecto entre las distintas células.

2. La velocidad de conducción por las fibras reales varía muy considerablemente, en tanto que todas las redes que utilizamos poseen fibras con velocidad constante.

3. En los sistemas nerviosos reales se producen interacciones a través de las membranas que separan unas células nerviosas de otras, cosa que no sucede en nuestras redes neurales.

4. Cuando tiene lugar la activación se producen en los nervios ciertas modificaciones bioquímicas y eléctricas; mas es evidente que las redes neurales no tienen en cuenta tales procesos.

5. De todas las demás diferencias, finalmente, la más obvia es acaso que cabe clasificar los nervios reales en los que poseen vainas de mielina, los que [sólo] tienen neurilema, etc., frente a la imposibilidad de hacer lo mismo con las redes neurales.

Por encima de todo lo anterior se encuentran muchas características del sistema nervioso —tales como las de sumación, fraccionamiento, reclutamiento *, etc.— que hemos de estar dispuestos a imitar si es que nuestros sistemas nerviosos conceptuales han de acercarse algo más a la cosas reales.

Tenemos que ocuparnos directa e inmediatamente de estos puntos; y argüiremos, principalmente, que montando en el modelo elementos introductores de demoras podemos superar las diferencias de velocidad de conducción y otras diferencias debidas a los diversos períodos refractarios (con lo que damos cuenta de 1. y 2.).

Supondremos que los factores electroquímicos, y los demás factores orgánicos que den origen al impulso nervioso, están vinculados a la forma en que el sistema nervioso tramite la información, y no al paso o flujo mismo de ésta; dicho de otro modo, podemos considerar que nuestras redes conceptuales hacen pasar la misma información [que las reales], sin entrar en detalles físico-químicos.

En cuanto al último punto hay que decir que la sumación, el fraccionamiento y el reclutamiento (GEORGE, 1961) se simulan sin dificultad, y que incluso son conceptualmente necesarios en cualquier sistema que transmita información de un lugar a otro *(verbi gratia,* la retina al córtex visual) cuando se necesita economizar el número de fibras disponibles que se usen.

Aún otra cuestión que es preciso mencionar ahora consiste en la relación existente entre dos tipos de modelo: el analógico y el digital. Sin

* Esta última —que acaso necesite aclaración— es la propiedad de adjuntar o «reclutar» en la corteza cerebral más impulsos eléctricos (de igual frecuencia que ellos) a los estímulos que se hagan llegar desde ciertas zonas infracorticales, si es que éstos tienen la frecuencia apropiada. *(N. del T.)*

intención de contender acerca del empleo de métodos analógicos para el cerebro, podemos decir, sin duda alguna, que cabe simularlos perfectamente con recursos digitales, sin más que valerse de mediciones todo lo pequeñas que nos parezcan bien y [transcritas en guarismos] digitales. Así pues, no existe barrera alguna que se oponga a la representación de procesos analógicos por medio de redes neurales.

Mas con ello no se acaban las dificultades conceptuales con que tropezamos. Lo que estamos proponiendo es un modelo formado por células que estén todas con las conexiones ya de antemano ejecutadas [*pre-wired*], y con el que hemos de simular un sistema que empieza por encontrarse codificado de la forma que sea y que sólo con el transcurrir del tiempo crece hasta convertirse en el sistema a que nos referimos, con la totalidad de sus conexiones; lo cual quiere decir, como muchos han indicado, que el modelo apropiado para el sistema nervioso humano no es, en absoluto, uno ya previamente conectado, sino uno que sea capaz de crecer (y ello constituye una de las consideraciones centrales de la presente comunicación, aun cuando hemos de ponernos de parte del modelo con las conexiones ya realizadas por anticipado).

Vamos a ocuparnos algo ahora mismo, por más que sea sucintamente, de esta cuestión del crecimiento. Durante el período correspondiente, desde el estadio de embrión hasta la edad adulta, el sistema nervioso crece y se modifica, de modo que para imitar con precisión este período del desarrollo parecen necesitarse redes que crezcan (CHAPMAN, 1959; PASK, 1959) o algún otro género de modelo dotado de crecimiento. Pero sigue siendo razonable sostener que podemos reflejar con precisión el sistema nervioso completo mediante un modelo conectado de antemano —si bien sabemos, desde luego (HEBB, 1949), que, en realidad, posiblemente tampoco en este caso sea exacto, ya que en el adulto puede todavía modificarse el estado nervioso interno por un proceso de crecimiento del tipo propuesto por KAPPERS.

Una de las preguntas ahora centrales es la de hasta qué punto el hecho de que tenga lugar un crecimiento en las fases tempranas del desarrollo constituye un factor con influencia en el sistema una vez acabado. Dicho de otro modo: partamos de la forma que habíamos indicado de modelo con las conexiones ejecutadas previamente, y examinemos algunas de sus limitaciones —algunas de las cuales existirán por haber *crecido* hasta llegar al estado adulto, aun suponiendo que este último estuviese con las conexiones ya anticipadamente realizadas.

Otra consideración central en el presente trabajo es la de la organización del sistema conceptual humano, si bien aquí únicamente podemos esbozar, en términos generales, algunas sugerencias, y acotar algunos métodos de hacer que progrese semejante estudio.

Esta comunicación es de índole cibernética, y no neurofisiológica, de suerte que las preguntas que hemos hecho forman parte de un intento de

responder a la pregunta acerca de qué géneros de modelos conceptuales del sistema nervioso ofrecen probabilidades de dar frutos cuando se estudia el funcionamiento del cerebro humano. Como dice KLEENE: "Estos supuestos (los realizados físicamente en las redes neurales) son una abstracción de los datos proporcionados por la neurofisiología, abstracción que nos ofrece un modelo a partir del cual se convierte en un problema matemático exacto o el de ver qué tipo de comportamiento puede explicarse con él. Queda abierta la cuestión referente a lo ceñidamente que el modelo represente la actividad de las redes nerviosas reales; y ciertas modificaciones de los supuestos conducen a otros modelos parecidos. La neurofisiología no nos dice hoy cuál de entre todos ellos se acerca más a la perfección, ni tampoco es plausible que haya alguno que se ajuste con toda exactitud."

Así pues, lo que nos proponemos es restringir el campo de posibles modelos conceptuales.

II. ANALOGOS NEURALES DE LA ORGANIZACION NERVIOSA CENTRAL

Tenemos que esforzarnos por dar algún tipo de versión plausible del funcionamiento del cerebro a base de los principios y métodos con que ya contamos, aunque sea sólo para descubrir en qué forma no llegamos a alcanzar la meta propuesta. (Tales principios y métodos incluyen varias formas de clasificación, mecanismos específicos de análisis y los métodos generales aplicables a los sistemas con las conexiones realizadas de antemano.)

Supongamos, en primer lugar, que nuestro sistema perceptivo está montado sobre la base de la clasificación unida a ciertos mecanismos especiales analizadores, y que los principios son los que han indicado HAYEK (1952), UTTLEY (1955), CHAPMAN (1959) y otros autores. En lo que se refiere a la visión, podemos esperar que encontremos en la periferia una organización del tipo de la sugerida por OSGOOD y HEYER (1952), según la cual la retina transmite a la corteza visual la distribución normal de las excitaciones de modo tal que los máximos de tal distribución representen los perfiles "vistos". En este modelo son esenciales los movimientos oculares, lo cual presupone, además, que se produce una interacción entre distribuciones diferentes, lo cual ocasionará distorsiones y desplazamientos en el sistema visual. Con objeto de eludir las dificultades referentes a la discriminación visual, es probable que sea menester complementar el modelo de Osgood-Heyer con el siguiente postulado:

La distribución de las excitaciones en el córtex visual se aplana con la fatiga, con lo que disminuye el valor máximo de la distribución y aumenta su desviación típica.

Este trabajo no pretende debatir lo acertado o desacertado de este

género de modelo, ni tampoco sus detalles: lo que nos concierne es la organización central, y por ello hemos de detenernos únicamente en los rasgos sensoriales que estén ineludiblemente ligados a ella. Dicho con otras palabras, cualquiera que sea la organización particular de la corteza sensorial con respecto a las modalidades de la sensación, habrá algunas características centrales de la organización que serán, en cualquier caso, más o menos inevitables —o al menos nuestra teoría lo presupone así.

En realidad, nos encontramos inmediatamente con una importante dificultad (PRIBRAM, 1960), ya que parece probable que el sistema nervioso modifique *directamente* las entradas sensoriales (cosa a que hemos de referirnos más tarde, dado que es una cuestión clave para el nuevo punto de vista).

Ahora bien, hablando toscamente, lo que queremos es un sistema que se active desde el interior; pues se considera, por ejemplo, que el sistema límbico * está formado por homeóstatos, y que sus límites homeostáticos varían en función de la experiencia central —y es de creer que la formación reticular coopere en este punto con tal sistema para determinar el grado de consciencia—. Pero el punto más importante es que, ya proceda la actividad enteramente del interior o venga del exterior en conjunción con una activación interna, el cerebro mismo tiene que funcionar a modo de un comparador y modificador de los dispositivos homeostáticos, y, verdaderamente, automodificándose en lo que se refiere a su experiencia sensorial y motora.

Como es natural, hemos de pensar que la experiencia sensorial es función de todas las modalidades sensoriales; y el modelo que se le viene a uno a las mientes por sí solo es el de la clasificación central. Otro de los problemas principales que nos afectan es el del proceso de *generalización,* que implica una reorganización interna de la información y cierta interacción entre el almacenamiento jerárquico central (en donde suponemos almacenados los conceptos) y los sistemas activadores o motivadores que, según hemos supuesto, están conectados con los sistemas límbico y reticular y se encuentran vinculados a unos mandos homeostáticos sometidos a gradación.

Dispuesto el tablado de un modo muy general en esta forma, examinemos ahora la naturaleza de un montaje celular posible tal como el propuesto por HEBB (1949) y MILNER (1957).

Vamos a comenzar aceptando los principios básicos supuestos por HEBB, o sea, que las células que se hayan disparado juntas tenderán a seguir haciéndolo, y que el fraccionamiento, el reclutamiento y —posible-

* Que se puede localizar, como se sabe, en las circunvoluciones centrales de las caras mediales de los hemisferios cerebrales (las del cuerpo calloso —«cíngulo»—, del hipocampo y de la ínsula), juntamente con otras formaciones abrazadas por ellas (uncus, fimbria, fórnix, núcleos amigdalinos, etc.) (*N. del T.*)

mente— el crecimiento conducen a colecciones diferenciadas y sumamente organizadas de neuronas que funcionan en el sistema nervioso central.

La teoría de HEBB depende esencialmente de la noción de que las células que se disparan juntas quedan asociadas, formando lo que él llama un "montaje celular": cosa que sería posible por virtud de una disminución de la resistencia sináptica, debida al incremento de conexiones sinápticas entre las células del montaje. La fatiga neural sería un factor operante al cabo de cierto lapso temporal, y disminuiría el efecto de la estimulación. En las fases tardías del aprender (en el estadio de "haber aprendido"), gran cantidad de células resultarían superfluas y se desprenderían de la estructura subordinada [a la ejecución de lo aprendido], dejando solamente el montaje celular superordinado. También se supone que estos montajes son difusos y se encuentran entrelazados por toda la corteza. (Adoptamos todo esto, tomándolo de la teoría de HEBB.)

Asimismo aceptamos los principios generales propuestos por MILNER, según los cuales la selectividad del sistema nervioso aumenta por efecto de la neutralización de ciertas zonas inhibidoras que se efectúa por medio de fibras excitadoras largas unidas a multitud de fibras inhibidoras locales: estamos aceptando, pues, esencialmente, la contribución aportada cuando se incluyen los procesos inhibidores, que aumentan la selectividad de la proyección del proceso del aprender en los montajes celulares. (Es indudable que en la corteza cerebral se encuentran fibras córtico-corticales largas, y hay muchas pruebas de que las zonas locales que rodean cualquier célula tienen fibras dotadas de conexiones inhibidoras, que formarían el operador selectivo que MILNER supone.)

Los conceptos de HEBB-MILNER no presentan dificultades para su simulación cibernética: apuntan a una retícula auto-organizadora del tipo de CHAPMAN, pero que pueda traducirse, dentro de los recursos de las redes neurales, en una red con las conexiones realizadas de antemano (si bien auto-organizadora). Vamos a suponer esto último, y a preguntarnos qué otras propiedades se necesitan para los procesos conceptuales.

Dos conceptos muy importantes sugeridos por MILNER son el de *amartillado* [*priming*], que se refiere a una sensibilización del montaje celular (o de la célula) de modo que se encuentre en situación fuertemente receptiva para con la estimulación, ya sea sensorial o asociativa, y, en segundo término, el de la importancia que en una retícula tienen las células que la orlen, que pueden enlazar unos montajes con otros y transferirse entre ellos por efecto de la experiencia. Mas ahora, y moviéndonos dentro de este boceto, hemos de esforzarnos por decir algo acerca de la formación de conceptos y por señalar algunos detalles más de la posible organización neural.

En el extremo de la entrada tenemos un conjunto de entradas autoclasificadoras (CHAPMAN, 1959), dotadas además, en la medida necesaria, de mecanismos analizadores especiales, cuya misión es simplemente la de

garantizar que se presenten al sistema —o montaje celular— clasificador central unas representaciones exactas de la realidad exterior. No obstante lo cual, incluso el grado de exactitud correspondiente sufre modificaciones, debidas al hecho de que la organización central tiene que modificar desde el comienzo la salida sensorial, hasta el punto de influir en lo que seleccionemos del medio ambiente: y ello sugiere términos teoréticos tales como los de *actitud* [*set*] y *atención.*

Como la organización central en que pensemos ha de ser, por lo pronto, un sistema clasificador que se auto-organice (aun estando ya previamente con las conexiones efectuadas), se nos ofrece inmediatamente todo un conjunto de modelos diversos (GEORGE, 1961) a base de redes neurales. Conviene percatarse de que es probable que no sea económico el género de modelo que se dibuja con facilidad (para simular lo que necesitamos): que, en realidad, irá más allá de un sistema clasificador completo; lo cual nos hace dudar sobre si podemos permitirnos o no un sistema de esta última índole para los procesos conceptuales del cerebro.

En segundo lugar hemos de mencionar una cuestión muy importante: la de que es imposible construir a base de las redes neurales actuales un sistema clasificador parcial que se auto-organice si es que ha de estar previamente conexionado y tiene que ser más económico que si su clasificación fuese completa. El método de CHAPMAN (1959), que es algo parecido al montaje celular tipo II de MILNER, aporta una modificación gracias a la cual los umbrales varían cuando se dispara una combinación concreta de entradas (o de células); y de este modo se consigue un sistema clasificador parcial que únicamente puede realizarse en forma económica suponiendo que la propiedad de cambio de la sensibilidad de las sinapsis sea función directa de la estimulación. Es posible que nos veamos forzados a aceptar esta forma de modelo, pero lo aplazaremos cuanto sea posible, pues, por diversas razones, queremos conservar el esquema de redes neurales.

Al llegar a este punto no habrá duda de que una red neural análoga a la de la figura 1 puede realizar fácilmente la función deseada (aunque, naturalmente, es sólo una entre muchísimas redes posibles). Es algo trivial que se pueda conseguir semejante cosa, pero tiene importancia saber que valiéndose únicamente de redes neurales se requiere gran número de células.

La otra alternativa a nuestro alcance es, desde luego, tener a la vista células que no tengan conectadas todas las fibras, y cuyas conexiones se vayan efectuando a lo largo de un proceso real de crecimiento. Vamos a suponer que durante el período formativo del ser humano, de la concepción a la madurez, tiene lugar un crecimiento de esta índole (probablemente dirigido electroquímicamente), pero que subsecuentemente el sistema permanece fijo desde el punto de vista anatómico, y que cambia sólo funcionalmente. Consideremos ahora por un momento la tarea que tiene

que realizar nuestro sistema conceptual: cabe restringir el pensar (BRUNER *et al.*, 1956) al recoger testimonios empíricos [*evidence*] clasificados de suerte que se nos ofrezcan por sí solas hipótesis conyuntivas o adyuntivas [*disjunctive*]; y un sistema de tipo maquinal (PRICE, 1962) puede

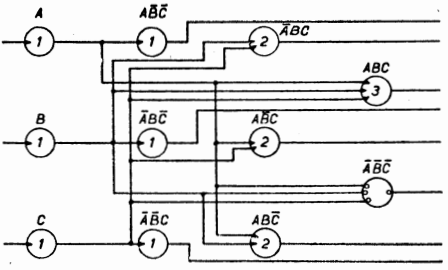


Fig. 2. Una retícula neural sencilla, en la que se observan las asociaciones (y contadores) que se necesitan para simular la construcción de hipótesis.

suministrárnoslas sin dificultad; así, en la figura 2 puede verse la manera en que cabe que se ofrezca una hipótesis en el modelo maquinal.

No hemos de pensar que el pensamiento quede completamente definido por el tipo de experimentos de BRUNER *et al.*, pero, en la medida en que éstos abarcan una gran parte de la resolución de problemas y de la formación de hipótesis en los seres humanos, es posible simularlo con facilidad mediante redes nerviosas: para ello no se necesita más que un conjunto de contadores que lleven la cuenta de la conyunción o adyunción [*disjunction*] de unas propiedades conocidas. Además es preciso ampliar la red de dos formas distintas: la primera consiste en poner en relación la red clasificadora conceptual con el sistema motor, y por la segunda se integran estas redes clasificadoras parciales en *ramas ampliadas*, que mezclen las informaciones procedentes de aquéllas (estas ramas han de permitir hipótesis ulteriores de generalidad creciente). Y, naturalmente, hemos de suponer que disponemos de medios de calcular probabilidades condicionales entre los contadores de los sistemas clasificadores parciales y mixtos.

Tenemos que exponer ahora, al llegar a este punto, algunas consideraciones sobre las dimensiones. En el sistema sensorial humano, una clasificación completa es absolutamente implausible si tenemos en cuenta *juntamente* todas las entradas posibles; pero ello no impide que haya dos importantes salidas para llegar al sistema clasificador *central* que nos interesaba: *a*) cabe hacer una partición del sistema de clasificación, esto es, podemos suponer que ésta se efectúa por fases (y así, por ejemplo, *a*, *b* y *c* pueden clasificarse en la fase I, en tanto que *d*, *e* y *f* lo sean en la II), y *b*) se pueden clasificar aparte todas las salidas juntas. Así se consigue una gran economía en cualquier cosa que se asemeje a un sis-

tema clasificador completo, y se trata de algo evidentemente necesario en el caso de que existan diversas modalidades sensoriales con las que haya que efectuar una partición en visuales, auditivas, etc.

El hecho de que todo lo que se necesita para establecer las bases de los tipos conyuntivo y adyuntivo de hipótesis (tan comunes en la resolución humana de problemas) sea un conjunto de contadores a los que se obligue a contar la aparición o no aparición de unas propiedades tiene gran interés para nosotros, ya que semejantes aparatos contadores pueden proporcionarnos, pues, la base para todos los argumentos lógicos de apoyo ostensivo o susceptibles de ser reducidos a propiedades de denominación simple, tales como rojo, redondo, cuadrado, etc. Y teniendo esto en cuenta diremos que el sistema clasificador está constituido por contadores, y que el sistema mismo es parcial y está sometido a partición. Ahora bien, el punto vital es que el lenguaje (de símbolos, signos, etc.) forma parte de este sistema de clasificación, y que el nivel más elevado de la jerarquía de éste *está formado exclusivamente por contadores de símbolos y signos,* puesto que las eventuales abstracciones de nuestro pensar se efectúan con palabras, los argumentos usados son lingüísticos y, además, ello no elimina las relaciones existentes entre las palabras y los conceptos (que es una relación de uno a muchos cuando se desciende de la parte más alta de las ramas a lo largo del árbol clasificatorio).

Así pues, es preciso concebir la relación entre el lenguaje y los conceptos de manera muy parecida a la que media en una computadora digital entre las instrucciones y los números: las palabras y los conceptos están, como si dijéramos, formando una tabla de doble entrada, y en los sistemas clasificadores aquéllas se representan mediante contadores.

Mas nos estamos ocupando de la plausibilidad neurofisiológica, lo cual apunta a un sistema conceptualmente preciso y, con todo, traducible a base de redes neurales, que sería el siguiente.

Hemos de suponer que en los estadios iniciales del crecimiento las fibras crecen juntas en función de dos variables: 1) el código genético, que prescribe los tipos de conexión que se producirían si no intervinieran factores procedentes de la experiencia, y 2) los efectos que origina ésta en el sistema; lo cual quiere decir que probablemente el aprendizaje es vital en cuanto a determinar cuál haya de ser la *estructura* definitiva del sistema nervioso.

Convendría dejar completamente en claro que el código genético influye en el crecimiento en lo que respecta a los pormenores químicos; ahora bien, hemos concedido que —en el presente nivel descriptivo— éstos no tienen mucha importancia cuando tratamos de entender el flujo y almacenamiento reales de información. Sobre ello, el crecimiento es cuestión de formación de réplicas y organización dirigidas, cosas que pueden simularse mediante redes neurales, con tal de que aceptemos el hecho de que esté permitida la constitución de réplicas de los subconjuntos de

las redes. En la actualidad se están realizando trabajos en Bristol (SMITH, 1962) siguiendo estas directrices.

Una vez que ha terminado el crecimiento —o que ha terminado en términos generales, dejando de lado una pequeña proporción de crecimiento y regeneración ulteriores—, es de esperar que encontremos el género de aprendizaje que se observa en los sistemas con las conexiones ya realizadas.

Pero incluso cuando por fin el crecimiento como tal ha terminado, sigue siendo de esperar que se aprenda merced a variar la sensibilidad del sistema; y ahí es donde hemos de buscar un sistema clasificador con particiones, que ha de haber surgido como resultado de la auto-organización; es decir, como función de la experiencia. Veamos primero el sistema ya acabado (que representa el pensar y el aprender adultos): es de suponer que nos encontremos con que se ha formado un sistema clasificador parcial y sometido a una partición, que podemos re-

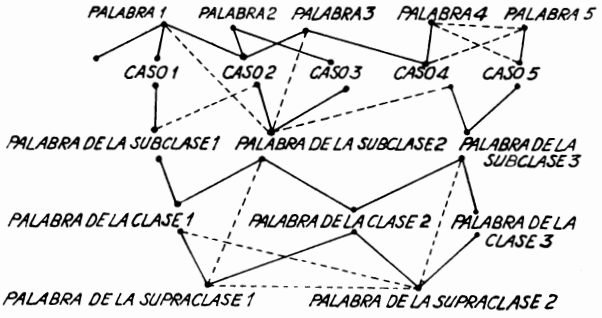


Fig. 3. Muestra de estructura arborescente de un sistema de clasificación parcial sometido a partición, para almacenar palabras (y frases).

presentar mediante la figura 3 (en la que se observa una muestra típica de las disposiciones tridimensionales de células que pueden existir).

Apenas es necesario añadir que los hechos de superposición cortical sugieren que los distintos montajes celulares (HEBB, 1949; MILNER, 1957) que aquí se encuentran son, a su vez, función directa de la experiencia.

Pero queremos asimismo proporcionar montajes celulares a muchos niveles distintos de generalidad, y, por consiguiente, pretendemos encontrar un lugar especial para el uso de signos y de símbolos, que desempeña un papel vital en el pensar humano.

Hemos representado en la figura 3 lo que tenemos en forma esquemática.

Este género de organización en árbol genealógico permite que se almacene cualquier concepto determinado en una posición, juntamente con todo un conjunto de asociaciones inmediatas: estimúlese el concepto de árbol

en la figura anterior, y diversos otros conceptos, desde los de bosque, roble, álamo, etc., hasta los de bosques concretos en regiones concretas, formarán la gama de elementos que también se despertarán (desde luego, pueden muy bien no alcanzar, en absoluto, el nivel del umbral, pero, pese a todo, son capaces de hacerlo). En cuanto a los factores que determinan las condiciones para tal despertarse, incluirán, al menos, los siguientes: 1) el momento de la estimulación inmediata; 2) la urgencia con que se necesite la respuesta; 3) el estado de "alerta" del sistema en el instante en que sea estimulado, y otros semejantes.

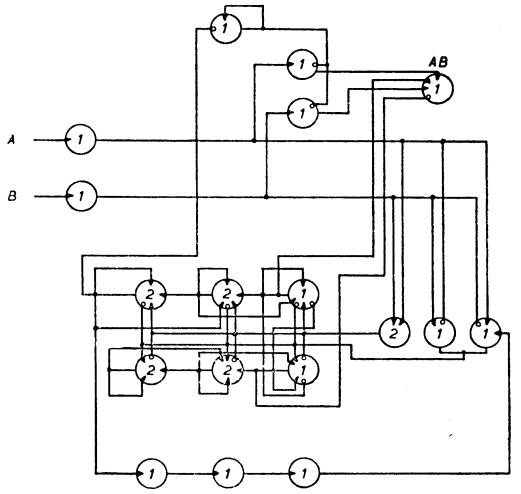


Fig. 4. Modelo de red neural en el que se presenta una red simple asociativa dotada de un refuerzo selectivo apropiado; así, o A sola o B sola harán que se dispare AB, en función del volumen de experiencia previa (y relativamente reciente).

Además, cuando existen signos no sólo se estimulan los conceptos, sino que también se despiertan los marbetes (símbolos, signos, etc.) asociados a ellos. Desde un punto de vista lingüístico es de esperar que, como los conceptos, las palabras se almacenen en una relación de muchos a uno con otras palabras; y, verdaderamente, cada palabra podría encontrarse en la desembocadura de un almacén cuyos artículos fuesen toda la gama de frases en que ella pudiera aparecer. (Estamos alejándonos demasiado del problema de formar un modelo neural.)

Propongámonos ahora una vital pregunta, que se ha suscitado con frecuencia: ¿tiene el cerebro unas ubicaciones específicas para informaciones determinadas o se vale de registros generales, como hacen las computadoras digitales de uso general?; ¿es capaz, por lo tanto, de colocar cualquier información en cualquier parte y de reemplazarla luego por otra distinta?; ¿o bien trabaja hasta cierto punto con ambos sistemas?

Vamos a suponer esto último, o sea, que funciona de las dos maneras. Pues las zonas de la corteza cerebral son distintas, pero se solapan; lo que se queda en el almacén general es general, y, sin embargo, está trincado a muchas particularidades, de modo que un solo y mismo estímulo evoca cosas parecidas entre sí; y es evidente que aquí opera el principio de asociación, sin apenas dar lugar a dudas de que un estímulo concreto cualquiera despierta *cosas parecidas.* Tenemos, así, que la estimulación eléctrica del cerebro (PENFIELD y RASMUSSEN, 1950) suscita acontecimientos relacionados entre sí en puntos espaciotemporales asimismo relacionados; y, además, hay muchas pruebas en favor de un solapamiento funcional del córtex cerebral (LIDDELL y PHILLIPS, 1951).

Podemos suponer que, en tanto que en el sistema nervioso se encuentran circuitos reverberantes y— según han puesto en claro los trabajos de BURNS (1958)— una estimulación muy pequeña puede dar lugar a un gran volumen de actividad nerviosa, el almacenamiento en el cerebro de acontecimientos es en cierta medida dinámico, y depende de cosas tales como las relaciones que existan entre los potenciales eléctricos en puntos distintos en los que la sincronización del dispararse sea un factor decisivo para que un estímulo elicite una respuesta.

Mas el almacenamiento tiene que entrañar, a la vez, que se establezcan conexiones entre el sistema sensorial y el motor. Por más que hablemos de un *sistema central de clasificación* que simule el proceso del pensar (y, en especial, el del pensar abstracto), de lo que realmente continuamos hablando es de densidad de conexiones o de sensibilidad para las entradas y salidas; habría que aludir una vez más (STEWART, trabajo no publicado) a que actualmente se está dejando de recalcar la idea de un regimiento sensorial de las actividades cerebrales y se pasa a la de regimiento motor: las operaciones motoras realimentan el cerebro en forma homeostática, de modo que la modificación de las entradas se produce justamente en el instante en que inciden por primera vez sobre el sistema sensorial humano. Lo cual significa, simplemente, que el cerebro no es, sin más, un sistema con una entrada y una salida, sino uno dotado de una regulación graduada que atiende mucho más a la salida que a la entrada; y esto subraya —si se nos perdona el uso de semejante terminología— los aspectos de búsqueda y de finalidad que encontramos en la función del cerebro humano.

Por traducir todo esto al alfabeto de los montajes celulares: estamos diciendo que estos montajes constituyen el método de almacenamiento más importante para el ser humano, y que se trata de un proceso automodificador que opera cortocircuitando selectiva y progresivamente el conjunto de células involucrado en una asociación conceptual determinada (cuando la persona pasa, digamos, de *aprender* a *haber aprendido);* con los recursos de las redes neurales, ello implica el uso de células que no estén dedicadas específicamente a un conjunto particular de cosas aprendidas,

lo cual puede lograrse con un sistema que tenga las conexiones ya ejecutadas (se trata del principio que se hace visible en la red de la fig. 1). Es preciso admitir que este método no es inmediatamente recomendable por razones de plausibilidad neurofisiológica; y si resistimos una vez más la tentación de abandonar las retículas neurales, puede vislumbrarse que, hablando neurofisiológicamente, cabe trazar redes más plausibles. (La tentación consiste en aceptar el tipo chapmaniano de red de crecimiento, que, aunque tiene las conexiones realizadas de antemano, se auto-organiza y podría hacer con más facilidad que las rutas a través del córtex pasasen de indirectas, durante el aprendizaje, a directas, una vez que se haya aprendido.)

Sin embargo, para volver a la cuestión del pensar humano: estábamos diciendo que está representado por un sistema clasificador que inicialmente se encuentra en crecimiento y en el que se van estableciendo conexiones conforme el organismo madura, así como que los pormenores de tales conexiones se modifican, en cada caso, en función de la experiencia habida; y parece que cuando se alcanza la madurez existe una partición en sistemas clasificadores parciales, que todavía pueden modificarse por virtud de otros aprendizajes, si bien sólo *dentro* del marco del sistema parcial que sea, con su partición y sus conexiones ya realizadas. Podemos suponer, en general, que las ideas originales y las actividades creadoras, cualquiera que sea su índole, dependen en tal momento de una realización plena de todos los troncos y ramas del sistema de clasificación; resulta natural, además, la suposición de que estos troncos y ramas superiores se albergan en los lóbulos frontales.

Es también natural que nos sintamos inclinados a suponer que estos confines superiores del cerebro tienen mucho que ver con los símbolos, los signos y los marbetes verbales en general, así como con su relación con la representación nerviosa de la experiencia empírica. Resumamos al llegar a este punto el modelo que hemos bosquejado en unos pocos y breves enunciados.

1. Suponemos que el cerebro está representado por un modelo dotado de crecimiento mientras madura, pero por uno con todas las conexiones realizadas una vez que haya madurado.

2. El aprender durante el crecimiento modifica el sistema de clasificación parcial, con partición, que vaya a surgir con la madurez.

3. El cerebro funciona disponiendo montajes celulares más o menos a la manera de HEBB-MILNER, excepto en cuanto a que consideramos que los montajes del nivel conceptual adoptan la forma de un sistema clasificador parcial dotado de una partición.

4. Hemos de considerar el cerebro como un sistema representativo de regimiento de los homeóstatos que rigen directamente, a su vez, gran parte del comportamiento humano y de provisión de un sistema para el pensamiento conceptual.

5. Aunque acaso no sea necesario el lenguaje para pensar, suponemos que constituye el vehículo del pensamiento humano real, y que es necesario en el nivel más elevado del pensar: en los niveles clasificatorios supremos sólo aparecen símbolos, palabras, etc.

En la medida en que estén representados por las investigaciones neurofisiológicas actuales, los hechos neurales del cerebro humano no son incompatibles con este modelo, y si recordamos el solapamiento de las retículas *multiplexuadas* (VON NEUMANN, 1953), en las que existen acúmulos o pozas [*pools*] de neuronas que pueden formar parte de montajes celulares distintos en momentos distintos, esta idea se vuelve bastante clara y en modo alguno implausible.

Mas al lector no le cabrá duda de que no hemos llevado a cabo realmente, en sus detalles, el intento de presentar el modelo con los recursos de las redes neurales. No se trata, en absoluto, de algo imposible, pero sí extremadamente difícil; es literalmente casi imposible trazar semejante retícula. Otra posibilidad a la que, con toda seguridad, se va a prestar mucha atención en el futuro es la de realizar una "semilla" y proyectar de tal modo aquello de que sea capaz que, en definitiva, a partir de ella se deriven unos modelos conceptuales análogos a los que estamos describiendo; y a esto es a lo que antes nos hemos referido al hablar de crecimiento (SMITH, 1962). O bien podemos usar el método —que es el que empleamos para someter a contraste nuestro modelo— que describiremos en el apartado III.

III. LA MOTIVACION Y EL MODELO CONCEPTUAL

El modelo que hemos bosquejado hasta el momento padece el obvio defecto de que no tiene en cuenta de ninguna forma el problema del refuerzo selectivo.

Es perfectamente conocido que en los seres humanos (y, en realidad, en todos los organismos) existe un sistema de motivaciones gracias al cual se registran las necesidades; y el sistema de reducción de éstas forma parte, ciertamente, de lo que con su energía pone en marcha la actividad conceptual del sistema nervioso. El organismo transmite directamente a éste tal actividad energética, que o bien inicia un comportamiento de búsqueda —ya sea ésta o externa y manifiesta o interna (por medio de un almacenamiento)— o bien se embarca en toda suerte de actividades conceptuales. Así, es necesario, por ejemplo, que se despierte hambre con los movimientos peristálticos del estómago, que se registran en el sistema nervioso central, y ello conduce a una actividad de búsqueda o a tomar una decisión referente al alimento; o bien puede ocurrir que los pensamientos acerca de éste, surgidos como resultado de una conversación o algo parecido, lleven a un "darse cuenta" de la necesidad pre-

existente (esto es, una cosa puede preceder a la otra, y a la inversa). Sobre esta base de reforzamiento selectivo hemos de tomar todavía decisiones relativas a dónde, qué y precisamente cuándo comer, en lo que se refiere al impulso del hambre; y en cuanto a cualquier otro impulso surgen cuestiones de decisión exactamente del mismo tipo. Es menester indicar inmediatamente que no estamos diciendo que necesariamente todo comportamiento haya de estar motivado (aun cuando podrían exponerse muchas cosas en favor de tal punto de vista): lo que decimos, de hecho, es que el grueso del comportamiento implica un cambio en el estado del organismo, y que esto significa, por lo general, un cambio de necesidades —o sea, de estado motivatorio—. Existe el caso límite, en el que la variación de las motivaciones puede ser cero o tan pequeña que carezca enteramente de importancia; pero lo que importa es que el sistema de motivaciones actúe como reforzador selectivo y entre en interacción a todos los niveles con el sistema conceptual.

Estamos suponiendo —cosa que se considera generalmente hoy como perfectamente validada— que el sistema límbico constituye, juntamente con la formación reticular, un activador primario del sistema conceptual, lo cual significa que estamos diciendo que aquel sistema y esta formación son la fuente de la información de índole motivatoria que proviene del resto del organismo (cosa que encaja en el panorama hasta ahora presentado, según el cual el cerebro sería un sistema destinado a modificar los regidores [*controls*] homeostáticos activados por el sistema motivatorio).

Lo que ahora sostenemos es que el pensar abstracto, el conceptual, etc., están sometidos a cambios de las motivaciones, aun cuando sea de un modo algo más indirecto que el género de actividad de aprender o aprendida ligado de cerca a la búsqueda del alimento cuando se tiene hambre, por ejemplo.

En lo que se refiere a las motivaciones, vamos ahora a ocuparnos del término teorético *tote* (sigla de *"test-operation-test-exit")* *. Se trata de un concepto del que se ha propuesto que ocupe el lugar de la noción, harto más simple, de reforzamiento selectivo, que han mantenido autores tales como THORNDIKE y HULL, juntamente con los diversos conductistas que han venido escribiendo sobre estos asuntos durante los últimos cuarenta o cincuenta años. Pues se tiene la idea de que el concepto de *tote* recalca que lo que hay es un organismo activo, que tiene finalidades y que gobierna los estímulos a los que es sensible y contando con los cuales actúa: con él se saca a luz perfectamente el hecho de que ya no se piensa que el organismo sea un sistema regido sensorialmente, sino— al menos en parte— motóricamente. En algunos respectos se trata de un cambio parecido al cambio de hincapié que se encuentra al pasar de la teoría hulliana del aprendizaje a la de Tolman; mas presenta la dificultad de que,

* En castellano sería algo así como «prueba-actividad-prueba-final». *(N. del T.)*

aun cuando se ha conseguido una mejora en un concepto (más bien pasivo) acerca de cómo se origina una necesidad y de cómo se reduce por medio de estímulos sonsoriales adecuados, sigue siendo completamente inadecuada para retratar el conjunto de cuanto está entrañado en la operación del reforzamiento selectivo.

Es enteramente verdad que, en lo que se refiere a entradas, uno trata de aplicar la sencilla prueba de la congruencia y la incongruencia, y que cuando se consigue la primera decimos que se ha satisfecho la necesidad (se acaba la búsqueda). Pero al mismo tiempo es preciso enfrentarse con el hecho de que, debido a dilaciones largas en las actividades del comportamiento —cosa que, por sí mismo, sugiere la existencia de un sistema de almacenamiento bastante complicado—, en general no hay ningún acontecimiento sencillo que satisfaga tal prueba. En realidad, la actividad *tote* constituye un paso hacia la generalización de la teoría sencilla del reforzamiento, y, a su vez, ha de generalizarse mucho más. La generalización a que estamos aludiendo reside en que cuando se produce una congruencia —lo cual es relativamente raro— se saca una conclusión determinada, que sin duda alguna representa un cambio de estado de la retícula neural; cambio que se ramifica por las ramas del sistema clasificador central y que implica cierto grado de confirmación o de desfirmación [*disconfirmation*] en cualquier congruencia o incongruencia; además, la sección de "lo aprendido" de nuestro sistema clasificador (en la que las probabilidades no son iguales a la unidad, o no son superiores a cierto valor, K) queda modificada en alguna medida. Pero la inmensa mayoría de las actividades ejecutadas por el organismo son tales que no se llega a congruencia alguna; o, en el mejor de los casos, sólo a una congruencia parcial, como está implícito en términos tales como grado de apoyo fáctico y grado de confirmación; y cuando se consigue esta confirmación (congruencia) se da más fuerza al conjunto completo de montajes celulares dispuestos jerárquicamente. Dicho de otro modo: el sistema de motivaciones, que funciona como activador del conceptual, se halla en interacción con él en todo instante, y no satisface nunca completamente ninguna actividad de este último (jamás le proporciona una congruencia total), lo cual quiere decir que los términos teoréticos simples, tales como el de *tote,* nos parecen absolutamente insuficientes para describir la gama completa de actividades del sistema conceptual.

No vamos a continuar sobre esta cuestión ahora, pero lo más importante que queremos indicar en este estadio es que disponemos hoy de gran cantidad de testimonios empíricos acerca del equivalente neurológico del funcionamiento de la motivación, que es, evidentemente, necesaria. No nos ocupamos, ni podemos hacerlo, de los intrincados detalles de la interacción mencionada, que, sin duda alguna, exigirán algún tiempo para quedar a descubierto. Yo había pretendido originalmente presentar en esta comunicación pruebas neurofisiológicas, tanto de la interacción entre el sistema

de motivaciones y el conceptual como del funcionamiento de este último, pero es algo sin duda alguna imposible en el espacio de que dispongo. Bastará por el momento, así pues, con que señale que los principios sobre los que se apoya aquella interacción son, por lo menos, claros en sus rasgos básicos.

Neurofisiológicamente es difícil presentar pruebas que entren en conflicto con las hipótesis que hemos hecho aquí o que las confirmen. La idea [esencial] es que existen en la corteza zonas visuales (el área 17) y otras zonas sensoriales, que reciben la información procedente de ciertos receptores especializados y la clasifican parcialmente (en cuanto a lo visual, es evidente que aquí entran las áreas 18 y 19); también hay áreas específicas del habla, que se encuentran en interacción con los estímulos visuales y auditivos y de las que igualmente se piensa que clasifican la información de entrada. Las regiones temporal y parietal forman parte, casi con seguridad, del estadio siguiente de clasificación de la información procedente de los distintos sistemas clasificadores sensoriales; los lóbulos frontales se ocupan de las ramas de nivel más elevado, y aún tenemos en la corteza cerebral, desde luego, las áreas motoras y una gran cantidad de representaciones más internas. Todas estas redes están entrelazadas, como es patente, de forma extremadamente compleja.

IV. LA CONTRASTACION DEL MODELO

Hemos venido delineando hasta ahora los principios sobre los que querríamos construir unos modelos conceptuales del sistema nervioso; mas, pese a tener una intención muy distinta, no cabe duda de que es imposible construir realmente un modelo detallado y preciso, ni siquiera valiéndonos de redes neurales. Pero ya habíamos indicado esto anticipadamente, en parte, y habíamos pensado, en consecuencia, las ventajas que ofrecería el someter a contraste el tipo de teorías o método de teorizar que propusiéramos. Por una parte, a uno le gustaría decir —y es verdad— que las redes neurales son en sí mismas precisas y que se las puede construir de tal modo que quepa contrastarlas directamente; no obstante lo cual, en la práctica las dificultades son muy considerables: es difícil trazar realmente con sus pormenores los circuitos necesarios, y es probable que tal cosa no fuese, además, la manera más eficaz de someter a contraste la teoría de un modo real. Por consiguiente, reivindicaremos para nuestras redes neurales, por el momento, que constituyen, en principio, una forma efectiva de representar una teoría neural determinada, lo cual deja intacto el problema de hacer lo posible por decidir cómo podríamos someter la teoría que sea a una contrastación más precisa. No cabe duda de que ésta es necesaria e implica que podamos comparar de alguna forma las funciones del sistema nervioso conceptual que hayamos forjado con los siste-

mas nerviosos reales; en realidad, lo que queremos es un plano exacto, que pueda cotejarse con los mejores testimonios fisiológicos de que se disponga; y proponemos que con este objeto se emplee la computadora digital de uso general. Por lo tanto, tenemos que preparar un programa para tal computadora que sea efectivamente equivalente a la estructura de la red neural en que hayamos pensado; pero aquí nos encontramos con una dificultad, a saber: que hemos de especificar con todos sus detalles la misma red neural para la que se nos hacía muy difícil semejante especificación, lo cual significa que tenemos que continuar buscando algún tipo de equivalente efectivo de nuestra red neural; mas esto, por su parte, resulta ser un problema perfectamente atacable. Podemos abordarlo de varias maneras diferentes, pero lo que estamos indicando es que no es menester que tratemos de reconstruir o simular en el programa real de la computadora digital la organización anatómica real de la red neural; lo que sí es vital es que se simule en tal programa la *función* de esta red. Y esto quiere decir que podemos confinarnos enteramente en una matriz que se refiera a entradas, salidas y elementos almacenados, así como al modo en que varíen en función de las entradas y salidas habidas en la historia real de la maquina. La salida, desde luego, es función tanto de la entrada como del almacenamiento, y éste es función de la entrada; por ello sería posible mirar este problema como si sólo se refiriese a entradas y salidas, si bien en la práctica conviene emplear contadores, o elementos de almacenamiento, y reproducir el efecto acumulado de la entrada a lo largo de cierto período, almacenándolo, ya que se trata de la función básica de que depende directamente la salida. De este modo podemos construir un equivalente lógico de la fisiología del sistema nervioso conceptual, y no de su anatomía. Y, verdaderamente, si se necesitase la anatomía podríamos incluir en el programa de la computadora los pormenores anatómicos del sistema, así como los funcionales o fisiológicos; la dificultad reside, en este caso, en que para incluir la anatomía se requiere una proporción demasiado grande de su espacio de almacenamiento, lo cual reduce al nivel de la trivialidad la índole de los problemas con que el complejo puede enfrentarse; es decir, demasiado cerca del nivel en el que podemos anticipar, lápiz en mano, qué es lo que hará la máquina, sin tener que molestarnos en introducir previamente en ella la cuestión. Y ésta es una situación que hemos de evitar a toda costa; andamos tras de una forma de indagar cuáles serán las relaciones entre la entrada y la salida cuando entre ellas medie un tipo particular de organización (nuestro sistema simulador del cerebro humano), siendo la entrada y la organización interna en exceso grandes y complejas para que nadie pueda ver fácilmente de qué modo van a entrar en interacción y dar lugar a la salida que sea; cosa que, en realidad, es la esencia misma de todo el procedimiento de contrastación que queremos aplicar.

Seguimos frente a un gran cúmulo de dificultades en lo que respecta a

llevar realmente a cabo la programación; no obstante lo cual, nos encontramos en situación de valernos de los métodos de la codificación automática, que nos permiten enunciar de modo relativamente sencillo la organización interna que hemos de dar al sistema; y la computadora traspondrá luego, por sí misma, tal enunciación en los programas apropiados. En Bristol hemos hecho algunos esfuerzos en esta dirección, tendentes a codificar los sistemas nerviosos conceptuales y a someterlos a contraste bajo sucesiones particulares de entradas, sin perder de vista la evaluación de las salidas; y lo que se ha realizado hasta el momento, incluso en esta etapa inicial, nos permite darnos cuenta de la practicabilidad de semejantes métodos.

Espero haber dicho lo suficiente en este artículo para apuntar un enfoque metodológico de la neurofisiología relativamente nuevo y digno de estudio. La sustancia de la cuestión es la siguiente: en estos momentos es enteramente imposible evaluar seriamente modelos del sistema nervioso que sean suficientemente complejos y realistas, y por ello hemos propuesto en el presente trabajo, en términos muy generales, un modelo apoyado en un sistema de redes neurales "con las conexiones ejecutadas previamente". Es posible que este modelo concreto sea inadecuado por tener "las conexiones ya realizadas", y no cabe duda de que le falta generalidad, dado que hemos indicado ya que durante el proceso de maduración es menester representar el sistema nervioso por uno dotado de crecimiento; sin embargo, cuando se atiende al sistema nervioso adulto, cabe muy bien que la forma de modelo "con las conexiones realizadas de antemano" sea suficiente —y ciertamente basta para decirnos muchas más cosas de las que hasta ahora sabíamos acerca de lo que implican ciertos modelos neurales que construimos—. La extensión del método de programar (empleado aquí para la contrastación) a las redes con crecimiento —en las que las células llegan a quedar conectadas realmente como resultado de su actividad (el que la célula A se dispare simultáneamente con la B dará origen a que AB disponga de una conexión que antes no existía)— no presenta dificultades especiales; lo cual significa que el método de contrastación es general, por más que el de las redes neurales, que hemos propuesto como base de una programación, pueda muy bien carecer de generalidad. La dificultad con que aquí nos encontramos es que, cualquiera que sea el método que empleemos para construir el modelo —al menos en forma preliminar—, tiene que poseer verosimilitud neurofisiológica previamente a su introducción en forma de programa; y ello exige que se emplee algún tipo de procedimiento a base de redes neurales, aun cuando acaso sean equivocados, en ciertos aspectos particulares de detalle, los pormenores reales de las que actualmente suelen usarse.

La idea que nos ha guiado ha sido la de que hemos de sentar ciertas cuestiones de principio y determinados principios generales de la construcción de modelos antes de que podamos realizar éstos con algún albur

razonable de éxito. Hemos intentado decidir la cuestión acerca de las formas de modelo dotadas de crecimiento y "con las conexiones ya de antemano ejecutadas"; cabe decidir asimismo el uso de ciertos principios, tales como el de clasificación y el de organización jerárquica, y luego, al nivel neurológico, podemos aceptar ciertos principios —el de fraccionamiento, el de convergencia, etc.

El punto fundamental es que no podemos embarcarnos razonablemente en una preparación a gran escala de modelos, ya sea construyendo una computadora especial o preparando voluminosos programas para las computadoras existentes, a menos de que tengamos una garantía razonable de que por lo menos los principios fundamentales del proyecto son correctos. En la presente comunicación he intentado decir algunas cosas acerca de estos principios e indicar algo, al mismo tiempo, sobre la construcción de modelos y las programaciones que tenemos en marcha en Bristol.

RESUMEN

Hemos definido el autómata como un conjunto finito de elementos que satisfagan ciertas reglas especificadas, y hecho ver que cabe construir en medios diversos tales autómatas de suerte que realicen ciertas tareas inteligentes (tareas del tipo que normalmente se vincula a los seres humanos, y, en especial, a facultades cognoscitivas humanas, tales como la de pensar).

La clase de autómata que estudiamos en este trabajo pertenece al tipo de red lógica, que representa una especie de sistema nervioso idealizado o conceptual; y el principal problema a este respecto es el de mostrar la medida en que cabe hacer que semejantes autómatas se ajusten a los hechos descubiertos por los neurofisiólogos y neuroanatomistas.

Presentamos un bosquejo de ciertas redes lógicas e indicamos algunas características que guardan un estrecho parecido con diversas áreas de la corteza cerebral. En particular, hacemos un intento de apoyarnos en el "montaje celular" de Hebb y el "montaje celular, tipo II" de Milner, y esbozamos ciertas hipótesis referentes a una organización nerviosa conceptual de al menos parte del cerebro. Proponemos, además, algunos puntos generales destinados a poner el sistema nervioso conceptual más a la par con los hechos empíricos hoy presentes.

Hemos prestado atención, asimismo, al modo apropiado de someter a contraste el tipo de hipótesis que habíamos propuesto, lo cual, según se ha visto, implicaba la posibilidad de emplear una computadora digital; y hemos sugerido algunas cosas, en términos muy generales, relativas al modo de programar ésta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BRUNER, J. S.; GOODNOW, J. J., y AUSTIN, G. A. (1956): *A Study of Thinking*. Nueva York, Wiley.

CHAPMAN, B. L. M. (1959): A self organizing classifying system. *Cybernetica, 2,* 152-161.

GEORGE, F. H. (1961): *The Brain as a Computer*. Nueva York, Pergamon.

HAYEK, F. A. (1952): *The Sensory Order*. Chicago, University of Chicago Press.

HEBB, D. O. (1949): *The Organization of Behaviour*. Nueva York, Wiley.

LIDDELL, E. G. T., y PHILLIPS, C. G. (1951): Threshold for cortical representation. *Brain, 73,* 40.

MILNER, P. M. (1957): The cell assembly. Mark II. *Psychological Review, 64,* 242-252.

OSGOOD, C. E., y HEYER, A. W. (1952): A new interpretation of signal after-effects, *Psychological Review, 59,* 98-118.

PASK, A. G. (1959): Physical analogues to the growth of a concept. *Mechanization of Thought Processes*. NPL Symposium.

PENFIELD, W., y RASMUSSEN, T. (1950): *The Cerebral Cortex of Man*. Londres, MacMillan.

PRIBRAM, K. H. (1960): A review of theory in physiological psychology. *Annual Review of Psychology, 11.*

PRICE, W. (1962): *Machines That Think*. Trabajo distribuido privadamente, que se puede pedir a la Universidad de Bristol.

SMITH, M. J. A. A. (1962): Design for a Zygote. *Artorga Communication, 41.*

STEWART, D. J. (1959): *Automata and Behaviour*. Tesis de la Universidad de Bristol.

STEWART, D. J. (trabajo no publicado): *A Model for the Brain.*

UTTLEY, A. M. (1955): The conditional probability of signals in the nervous system. *RRE Memorandum, No. 1109.*

VON NEUMANN, J. (1953): *Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components*. Pasadena, California Institute of Technology Publ.

Interpretación del mecanismo de reflejos condicionados que inhibe la actividad de un órgano en funcionamiento

Por ALDO NIGRO

La interpretación que presenta BIKOV (1958) del mecanismo por el que la corteza cerebral gobierna los órganos en funcionamiento no parece ser satisfactoria ni definitiva, ni siquiera para su propio autor.

Los trabajos de investigación de la escuela de éste nos han proporcionado numerosos datos acerca del gobierno [*control*] que ejerce la corteza cerebral sobre los órganos internos. Y refiriéndose a los experimentos y consideraciones de diversos autores (IVANOVA, VEDENSKI) sobre el fenómeno de la acción inhibidora de un estímulo condicionado sobre un órgano en actividad, BIKOV dice: "Los impulsos nerviosos que, provinentes de la corteza y atravesando los nervios eferentes, actúan sobre las células activas de las glándulas salivares llevan la excitación de éstas a un nivel mínimo; y podemos suponer además (puesto que en este caso hay siempre un elemento de arbitrariedad) que llegan continuamente impulsos —a través de la cuerda del tímpano hasta las glándulas salivares y a través del nervio vago al estómago y al colon— que se pueden llamar tónicos, los cuales mantienen la actividad del órgano en funcionamiento a un nivel determinado; la extinción de tales impulsos que sigue a la aparición en la corteza de un proceso de inhibición provoca, en efecto, un refuerzo del trabajo de la glándula, y, por el contrario, el refuerzo de los mismos que sigue a la estimulación de la corteza provoca una inhibición aún más completa" *.

Por el momento no tenemos intención de someter los resultados a que llega el científico ruso a una revisión crítica, entre otras cosas porque ello entrañaría en primer lugar una labor experimental que por ahora no hemos llevado a cabo; pero nos parece ser útil y posible la explicación de los resultados experimentales logrados por BIKOV y sus colaboradores de una forma distinta a como él lo hace. Consideramos útil, por consiguiente, proponer una nueva interpretación, que miramos en este instante como teorética, y que no sólo descansa en las observaciones experimentales de la

* En italiano en el original (con versión inglesa en nota a pie de página). *(Nota del traductor.)*

escuela citada, sino asimismo en una manera original de concebir el mecanismo completo de los reflejos condicionados.

La acción que ejerce un estímulo condicionado, que da origen a una reacción del organismo que ordinariamente se debía a un estímulo de un tipo diferente y aplicado en otro punto, ha dado lugar a diversas interpretaciones; pero su mecanismo real no se conoce todavía con seguridad. Creemos que podemos proponer una nueva hipótesis de trabajo que presenta ciertas analogías con la interpretación cibernética.

Según esta hipótesis, una estimulación condicionada será eficaz si es capaz de poner en acción un circuito neuronal concreto en que se encuentre registrada determinada reacción incondicionada que haya mostrado encontrarse en vinculación muy estrecha con la estimulación condicionada (figura 1). Cuando un estímulo condicionado alcanza las estructuras supra-

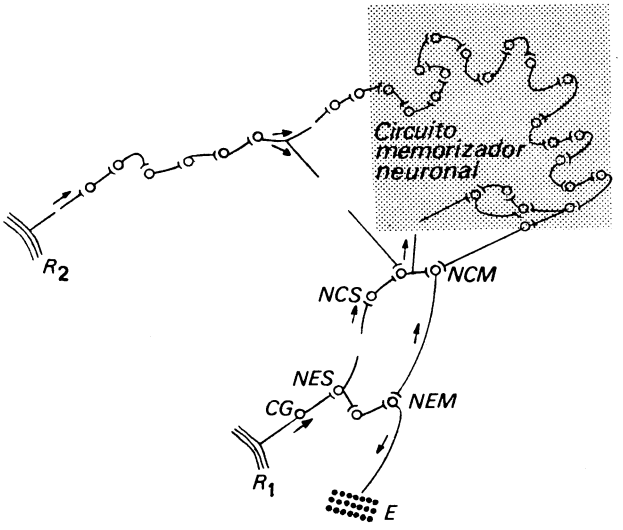


Fig. 1. Mecanismo del reflejo condicionado. Este posee un complejo mecanismo basado en la propiedad memorizadora de las estructuras supra-axiles: la asociación de un estímulo condicionado con un reflejo incondicionado ordinario da origen a una formación estructurada [*pattern*] particular, en la que se encuentran asociados el impulso debido al estímulo condicionado y a la reacción incondicionada.
Clave del diagrama: E, efector; R_1, receptor (del estímulo incondicionado); CG, célula ganglionar; NES, neurona espinal sensorial; NCS, neurona cortical sensorial; NCM, neurona cortical motora; NEM, neurona espinal motora, y R_2, receptor (del estímulo condicionado).

axiles * se mantiene en actividad y circulando durante cierto lapso de tiempo en los circuitos reverberantes de éstas; si mientras tanto el organismo

* O sea, las situadas por encima del eje del sistema nervioso central (la medula espinal). *(N. del T.)*

comienza a reaccionar al estímulo incondicionado, el impulso condicionado que hemos dicho se vuelve hacia el centro activo, y se deposita "en la memoria" una formación estructurada [*pattern*] que representa el circuito neuronal al que se debiera la reacción incondicionada juntamente con el impulso provinente del estímulo condicionado.

El impulso que surge al estimular un teleceptor no puede ser utilizado inmediatamente (ya que le falta una conexión directa con efector alguno), y por ello no puede dar lugar a una reacción única y aislada, sino que permanece "almacenado" durante cierto intervalo temporal. Lo cual es posible en virtud de que tal impulso encuentra en las estructuras de la corteza cerebral unas disposiciones apropiadas que le permiten circular indefinidamente; así lo expresa, de hecho, un conocido neurofisiólogo, INFANTELLINA: "La descarga asíncrona que acompaña a la deflexión positiva de la respuesta del limbo —a la estimulación eléctrica aislada— se debe a la actividad de las neuronas de axón corto de los estratos profundos de la corteza cerebral: aquella acción circula por circuitos funcionales cerrados formados por células y por sus dendritas y axones. En una red semejante de elementos conductores, la excitación puede circular un número de veces teóricamente infinito si es que el período refractario de los elementos excitables tiene una duración inferior a la del tiempo necesario para que la excitación pueda recorrer el circuito neuronal completo" *.

La utilización de las aferencias en un nivel cortical se produce por medio de la orientación debida al centro más activo, ya que la información que se recibe es múltiple, en tanto que la posibilidad de reaccionar es limitada (fenómeno de las vías comunes [*common way*]) **. Tenemos un ejemplo de esta situación en la epilepsia compleja, en la que el centro inicialmente más activo arrastra a todos los demás a una actividad convulsiva —cosa que es tanto más fácil cuanto menos activos sean estos últimos (como ocurre durante el sueño).

Cuando se lo aplica más tarde, una vez que se haya constituido una formación estructurada bien definida y estable en las estructuras memorizadoras (en virtud de un número adecuado de repeticiones), el estímulo condicionado es capaz de "poner en marcha" un esquema previo y de suscitar de este modo la reacción que llamamos condicionada. En realidad, cuando se llega a tal estado, al presentarse el estímulo condicionado no se trata ya de algo desconocido para las estructuras supra-axiles, sino que, una vez comparado con el "recuerdo" suyo que se conserve en el depósito

---

* En italiano en el original (con versión inglesa en nota a pie de página). *(Nota del traductor.)*

** Con esta expresión se denomina el conjunto de las células efectoras de la medula espinal, a las que van a parar tanto los impulsos procedentes de puntos cercanos de ella como los de puntos alejados y los de integración procedentes de la región encefálica: impulsos diversos, pues, que desembocan en una vía común. *(Nota del traductor.)*

de la memoria, se lo reconoce como pródromo de una situación que se ha presentado con anterioridad; y el organismo se encuentra, pues, en condiciones de anticiparse a la acción del estímulo incondicionado y de reaccionar en consecuencia.

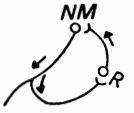


Fig. 2. Gobierno del impulso eferente, primer estadio. La descarga de la neurona motora estimula la célula de Renshaw (R), que vale para rebajar la actividad de aquella neurona.

La inhibición de la eficacia del estímulo condicionado, ya sea debida a un nuevo estímulo exterior o a un cambio interno del organismo, no contradice a nuestra hipótesis, pues es evidente que no es posible que cualquier situación nueva —y que, por tanto, no se haya sedimentado en la "memoria"— suscite la formación estructurada ya existente.

A nuestro entender, cabe aplicar esta explicación incluso cuando se trata de la acción inhibidora de un reflejo condicionado sobre un órgano en actividad. Tal explicación, pues, al mismo tiempo que recibe una confirmación indirecta de su posibilidad real (justamente en virtud de lo peculiar de este caso, que no es nada claro a primera vista), es capaz de proporcionarnos algunos elementos explicativos referentes a un mecanismo que hasta el momento había permanecido bastante oscuro.

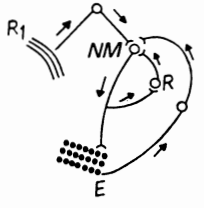


Fig. 3. Gobierno del impulso eferente, segundo estadio. En cuanto el efector (E) comienza a funcionar se origina una descarga aferente que se hace más intensa cuanto más fuerte sea la actuación de aquél, y que alcanza a la neurona motora con consecuencias depresoras.

En tales condiciones se produce de un modo regular la asociación entre un estímulo condicionado y la formación estructurada que se haya constituido; su peculiaridad reside en esta formación, que se ha convertido propiamente en tal durante la actividad y a la que, por lo tanto, le falta toda información inicial exteroceptiva; y la ausencia de tal información, en

tanto que está presente una información propioceptiva que tiende a oponerse por sí misma a que continúe la actividad (véanse las figs. 2, 3 y 4), puede explicar el hallazgo de que el órgano en funcionamiento detiene su propia actividad bajo el efecto del estímulo condicionado (fig. 5).

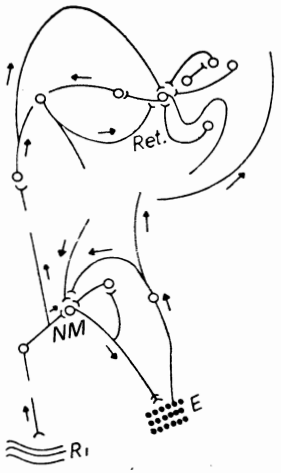


Fig. 4. Gobierno del impulso eferente, tercer estadio. Tan pronto como el centro supra-axil empieza a funcionar involucra el funcionamiento de la sustancia reticular (Ret.), la cual inhibe la actuación de dicho centro a través de un mecanismo complejo. (Para las siglas véanse las figuras precedentes.)

Está ampliamente demostrado que las aferencias son indispensables para estimular el organismo a la actividad: su carencia corresponde a la apertura de un circuito, y significa la abolición del funcionamiento de éste. Sin embargo, es preciso observar que las aferencias se integran a niveles distintos: cuando no existe actuación, la aferencia correspondiente no se detiene al nivel axil, sino que llega hasta los niveles supra-axiles, con lo que el organismo se informa de la presencia del elemento respectivo y puede sopesar su importancia y regular su reacción de acuerdo con ella. Las aferencias que llegan a los niveles supra-axiles, además de servir para las funciones específicas propias de ellas, valen para ejercer una influencia inespecífica general que mantiene el "tono" del organismo. Y, en realidad, las estructuras axiles no reaccionan a estimulación alguna a menos que experimenten la facilitación que ejercen los impulsos centrífugos procedentes de las estructuras supra-axiles: una vez que estos impulsos suscitan una reacción, las aferencias específicas dejan de llegar a la corteza, pues se las desvía hacia las neuronas motoras axiles, por las que encuentran una resistencia menor a su paso; de este modo no llega al córtex

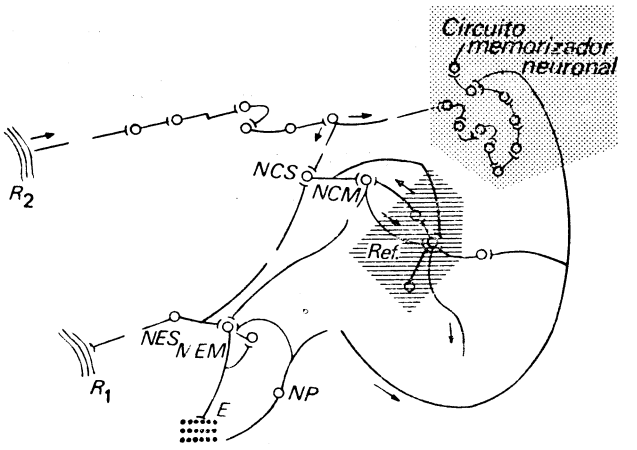


Fig. 5. Mecanismo del reflejo condicionado que inhibe la actividad de un órgano en funcionamiento. En cuanto consigue producir la reacción en el efector (E), la estimulación del receptor ordinario (R_1) no da origen a ningún impulso informativo hacia los centros corticales que estén bajo el efecto de los impulsos propioceptivos debidos al estado activo del efector; y en tales condiciones, la estimulación del nuevo receptor (R_2) se asocia con una formación estructurada a la que falta toda información exteroceptiva. Clave del diagrama: NES, neurona espinal sensorial; NEM, neurona espinal motora; NCS, neurona cortical sensorial; NCM, neurona cortical motora; Ret., sustancia reticular, y NP, neurona propioceptiva (sensorial).

ninguna información aferente específica durante la acción y aquél se encuentra completamente ajeno a la formación estructurada que pueda constituirse en las estructuras supra-axiles por asociación con el estímulo condicionado.

Nuestra interpretación se basa en una analogía con los mecanismos que se emplean para el mando de órganos activos, así como con los que guían la realización de ciertos procesos previamente dispuestos que se introducen en la máquina que tenga la tarea de efectuar una operación determinada.

Las computadoras o cerebros electrónicos son hoy capaces de ejecutar muchas operaciones que imitan el comportamiento humano. Algunas de ellas (ciertamente, las menos complejas) se efectúan por medio de datos registrados en cinta magnética, que se introducen en la máquina, la cual proporciona al mecanismo [ejecutor] cualquier información que se precise para la tarea del caso; y suponemos que el reflejo condicionado se produce en virtud de un mecanismo análogo.

El organismo conoce ya el esquema operativo, que está recogido en el depósito memorizador; y el estímulo condicionado inicial es capaz de seleccionar el esquema correspondiente y de ponerlo en funcionamiento, de modo semejante a lo que ocurre con una máquina tocadiscos automática.

RESUMEN

Proponemos un esquema explicativo del gobierno por la corteza cerebral de un órgano interno en funcionamiento, esquema que se basa en los datos de la escuela de Bikov y en una interpretación teorética del mecanismo de los reflejos condicionados, cuya actuación sería posible mientras puedan suscitar una formación estructurada que esté de antemano bien definida en las estructuras cerebrales.

Sostenemos que los reflejos condicionados pueden inhibir la actividad de un órgano en funcionamiento porque en la formación estructurada que se suscita en tales condiciones faltan por entero impulsos aferentes incondicionados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BYKOV, I. (1958): *La Corteccia Cerebrale e gli Organi Interni.* Turín, Feltrinelli.

INFANTELLINA, F. (1957): I fenomeni elettrici della corteccia cerebrale isolata. *Relazione al IX Congresso Nazionale Società Italiana Fisiologia.* Florencia, Valsalva.

Los procesos tramitadores de la información en el cerebro

Por A. V. NAPALKOV

El desarrollo de la cibernética abre nuevas vías para el estudio de los mecanismos que gobiernan la actividad cerebral.

Una de las corrientes de investigación más importantes en esta esfera está formada por el estudio de los procesos tramitadores de la información: valiéndose de métodos experimentales se ha visto que es posible revelar ciertos sistemas de reglas (algoritmos) que subyacen a la tramitación de la información en el cerebro y que constituyen la base de las formas complejas de la actividad nerviosa.

El análisis del funcionamiento de un modelo creado sobre tales algoritmos hace ver que la descripción de los algoritmos que han salido a luz experimentalmente es completa y precisa, lo cual despeja el camino para ulteriores investigaciones acerca de los organismos vivos (ASHBY, 1958; FEIGENBAUM, 1961; GELERNTER, 1960; NEWELL, 1958). El nuevo método nos proporciona un análisis científico de cierto número de formas complejas de la actividad cerebral al sacar a la vista el sistema de reglas sencillas que determina la tramitación de la información (por ejemplo, la capacidad para resolver problemas), y el asentamiento de un sistema de algoritmos nos permite atacar la solución de otro importante punto, el de la estructura de la retícula nerviosa del cerebro. Es frecuente que los intentos de analizar de una forma directa las formas complejas de la actividad mental (tales como el pensar, la resolución de problemas, el reconocimiento de configuraciones, el aprender, etc.) apoyándose en la teoría de las retículas nerviosas resulten ser bastante dificultosos. Con objeto de llevar a cabo esta tarea es preciso realizar primero un análisis de las formas complejas de la actividad del cerebro al nivel de la tramitación de la información, sacando a luz para ello el sistema de algoritmos, y formular después determinadas hipótesis sobre la estructura de la retícula nerviosa que subyaga a éstos. Cuando cabe elegir entre varias hipótesis puede proponerse una forma definida de experimentación que corroboraría solamente una de ellas; así pues, de este modo es posible emplear el método de la investigación científica para elaborar y verificar diversas hipótesis; y, en consecuencia, una aplicación compleja del método de algoritmización y de la teoría de las retículas nerviosas permite un análisis a fondo de los

mecanismos que rijan el funcionamiento del cerebro y contribuye a llenar la laguna aún existente entre las investigaciones psicológicas y las neurofisiológicas.

Creemos que los nuevos métodos de investigación engendrados por el desarrollo de la cibernética conducen a un cambio radical en los que se han venido utilizando hasta ahora en el estudio del cerebro, y permiten al investigador pasar de una mera acumulación de datos a la realización de investigaciones experimentales con una finalidad determinada y basadas en una teoría científica refinada y compleja.

En el curso de las investigaciones que hemos llevado a cabo en la Universidad de Moscú hemos intentado emplear el método de estudio acabado de mencionar, que combina el descubrimiento de algoritmos por medios experimentales con la creación de modelos electrónicos, para analizar los mecanismos de la actividad del cerebro. Hemos intentado asimismo desvelar la naturaleza de los factores a los que se debe el desarrollo del estadio neurogénico de la hipertonía.

En el mismo curso de la experimentación hemos elaborado el sistema de métodos destinados a crear modelos del medio externo, modelos que incluían sistemas de relaciones de causa a efecto entre señales y acciones del organismo. Puede verse gráficamente tal cosa en la figura 1: las le-

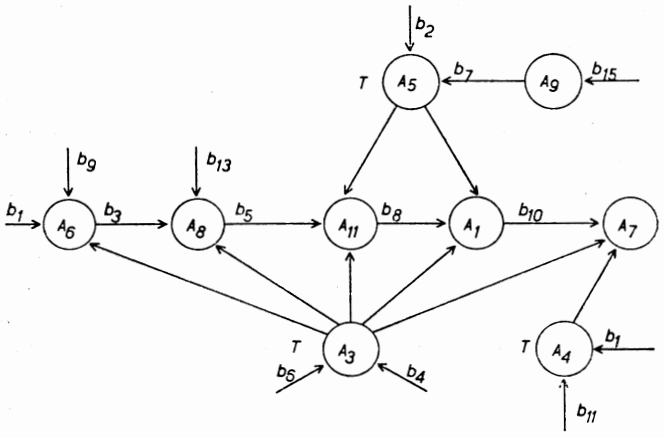


Fig. 1. Esquema de los sistemas experimentales. Véase la explicación en el texto.

tras A_1, A_2, ... A_n, designan señales diversas, en tanto que las letras b_1, b_2, ... b_n designan distintas acciones del organismo. (La letra A denota la solución de la tarea propuesta al sujeto, o la obtención de un reforzador —alimento, por ejemplo— por el animal en experimentación.)

El esquema quiere decir que si en presencia de la A_6 el sujeto —o el animal— ejecutaba el movimiento b_3, el experimentador tenía que introducir la señal A_8, mientras que si, por el contrario, se realizaba el movi-

miento citado en ausencia de la señal A_6, no se presentaba la A_8; y de este modo el experimentador podía, valiéndose de su propia actividad, reproducir unos rasgos definidos del medio externo. La aplicación de este método a lo largo de la experimentación nos ha permitido tener estrictamente en cuenta todas las señales y complejos de señales que procedían del exterior, así como todas las reacciones motoras y la estructura de la información almacenada en la memoria: no sólo nos ha sido posible investigar las respuestas reflejas del organismo, sino también analizar los procesos que se producían en el medio exterior. Así se ha visto que es posible asentar con toda precisión hacia qué cambios del entorno y qué nuevas señales apuntaban ciertos movimientos del organismo, cosa que ha sido de gran importancia para analizar la significación de los principios de la actividad cerebral revelada en el curso de los experimentos.

Así, pues, los métodos mencionados proporcionan nuevas posibilidades de sacar a la superficie los sistemas de reglas a los que está subordinada la tramitación de la información en el cerebro. Y hemos podido asimismo dar un análisis completo del ciclo íntegro de tramitación de la información que tiene lugar tanto en el organismo como en el medio externo, lo cual tiene mucha importancia para un análisis científico de los algoritmos de la actividad cerebral.

En el estudio del problema de los sistemas de regimiento auto-organizadores tiene una significación decisiva la idea de WIENER (1958) de que las formas complejas de la actividad cerebral se basan en un sistema jerárquico de programas de trabajo (cada uno de los programas de nivel elevado formaría, corregiría y regularía el programa de nivel inferior). En nuestra opinión, el análisis científico de gran cantidad de formas complejas de la actividad cerebral —cosa que no cabía concebir siquiera cuando se aplicaban los viejos métodos— se convierte en algo posible cuando se saca a luz la jerarquía de los algoritmos existentes en los distintos niveles.

La investigación que hemos efectuado en esta dirección ha hecho ver que ya en la etapa de estudiar los programas del primer nivel se nos presenta un panorama de enorme complejidad y que no se reduce a una mera suma de cadenas de reacciones reflejas.

Por ejemplo, nuestras investigaciones desvelan la existencia de unos mecanismos especiales de regimiento que conectan y desconectan secciones diversas de los programas de primer nivel ya formados y estabilizados (sistemas de reflejos condicionados). Sometiendo a un estudio a fondo los algoritmos de trabajo de tales sistemas de regimiento se ha averiguado que no siempre entran en ejercicio ciertas secciones de aquellos sistemas que se encuentran ya perfectamente estabilizados; existe, pues, otro sistema especial de reglas que determina el estado de actividad o de inactividad de unas secciones definidas del programa de trabajo ya formado.

El estudio de los algoritmos del siguiente nivel, el segundo (los algoritmos de auto-organización), revela un panorama aún más complejo.

El llamado principio del reforzamiento tiene gran importancia en psicología y en fisiología: está ligado muy estrechamente a la motivación del comportamiento y al problema de la génesis de las metas secundarias, y garantiza la apreciación y selección debidas de la información digna de crédito y útil. Hemos asentado que este principio se manifiesta en forma considerablemente más compleja cuando se estudian los algoritmos del segundo nivel.

La constitución de cada reflejo condicionado nuevo incluido en el programa tenía necesidad de unos reforzamientos repetidos. Los experimentos han desvelado la existencia de estímulos reforzadores de varios tipos que desempeñan diversos papeles en la formación de nuevos programas de trabajo, y hemos podido comprobar que para esta formación eran indispensables reforzamientos repetidos, a base de tipos diferentes de aquellas señales reforzadoras.

También han revelado los experimentos la existencia de todo un sistema —o estructura— de estímulos reforzadores que garantiza una selección plenaria de la información externa útil y digna de crédito; estructura que se forma en el curso de la vida de todo hombre y todo animal, en conexión indisoluble con la formación de nuevos programas de primer nivel de la actividad cerebral.

Para determinar la significación de cada señal reforzadora nos valíamos de su posición en el sistema, ya formado, de reflejos condicionados. Durante la constitución de un nuevo programa de actividad del cerebro, las diversas señales incluidas en él empezaban a desempeñar un papel definido en la selección ulterior de la información, así como en la formación subsiguiente de nuevas secciones del sistema de reflejos condicionados; y hemos descubierto la existencia de tipos diferentes de tales señales. Las señales reforzadoras del primer tipo, por ejemplo, desempeñaban un papel intermedio: reforzaban los elementos nuevos del programa (los nuevos reflejos condicionados) únicamente cuando se reforzaba la totalidad del programa con alimento, por ejemplo (reflejos incondicionados); las del segundo tipo garantizaban la formación de cadenas autónomas de reflejos condicionados, y no exigían reforzamientos repetidos. En conjunto, se constituyen unos mecanismos sumamente complejos y perfectos que garantizan el funcionamiento del cerebro como un sistema auto-organizador; y son mecanismos que frecuentemente se escapan a la atención de los investigadores (fisiólogos y psicólogos), ya que sólo se manifiestan cuando se somete a consideración el sistema en su integridad, con inclusión de la totalidad del organismo-en-el-medio-externo.

Hemos logrado desvelar los sistemas de reglas (algoritmos) que determinan qué señal —y bajo qué condiciones— puede convertirse en estímulo reforzador de un tipo u otro; hemos visto, por ejemplo, que si se introduce uno de los componentes de un estímulo complejo de un reflejo condicionado o si se elimina una señal inhibidora condicional, ello puede con-

vertirse en una señal reforzadora del segundo tipo, y la inserción de un estímulo que haya precedido antes repetidamente a la eliminación de la señal inhibidora condicionada puede asimismo volverse en una señal reforzadora. En general, hemos descubierto un sistema sumamente complejo de algoritmos, sistema que subyace a la formación del complejo descrito de estímulos reforzadores.

A continuación hemos aplicado un método simulativo para verificar y analizar los algoritmos descubiertos (BRAINES *et al.*, 1959c). Las investigaciones sobre el funcionamiento de un modelo electrónico han corroborado algunas de nuestras suposiciones, aun cuando se ha visto también que ni siquiera el complejo sistema de reglas aludido puede garantizar el funcionamiento de un sistema auto-organizador en ciertas condiciones, más o menos complicadas, del medio externo, y que, sin duda alguna, los cerebros del hombre y de los animales se valen de algoritmos aún más complejos y perfectos. En efecto: los que hemos descrito arriba presentan el defecto de que la velocidad de formación de programas nuevos de trabajo dependía de la aparición o desaparición accidentales, en el medio, de las señales que eran indispensables para la elaboración de tales programas, en tanto que el cerebro posee unos algoritmos que garantizan la formación de reacciones motoras que modifiquen de propósito el medio externo y hagan aparecer o desaparecer los estímulos precisos. Hemos llevado a cabo unos experimentos especialmente destinados a la indagación de este fenómeno, experimentos que han revelado la existencia de sistemas de algoritmos dotados de una complejidad todavía mayor; gracias a ellos se ha visto que el hombre y los animales poseen diversos sistemas algorítmicos, que se usan en una interacción sumamente compleja y que tienen cada uno sus ventajas individuales, de modo que su empleo resulta oportuno en unas condiciones bien definidas; y existe, a la vez, un algoritmo de un orden superior (tercero) que conecta o desconecta en momentos definidos los "algoritmos del aprender" del segundo orden. Como no podemos exponer aquí la totalidad del complejísimo sistema de algoritmos, vamos a citar un solo ejemplo.

En este caso, el algoritmo sale a luz en el curso de los experimentos. Se formó la siguiente cadena de reflejos: A_4-b_8-A_1-b_6-A_3-b_5-A_8-b_{10}-refuerzo, y se elicitó el reflejo condicionado A_8-b_{10}-refuerzo. 1) El sujeto ejecutó ciertos movimientos accidentales $(b_1, b_2, \ldots b_n)$ y diversos complejos de movimientos $(b_2, b_1, b_3, b_4 b_1; b_{15}, b_1, b_5)$; 2) cuando estos movimientos no conducían a cambio alguno en el medio externo ni aparecían señales nuevas $(A_1, A_2, \ldots A)$, el sujeto no repetía los movimientos ya ensayados, y algún tiempo después la actividad motora desapareció completamente; 3) pero cuando aquellos movimientos llevaron a la aparición de una señal indiferente $(A_1, A_2, \ldots A)$ absolutamente nueva (esto es, no ligada al reforzamiento), reaparecieron los movimientos que habían cesado antes $(b_1, b_2, b_3, \ldots b_n)$, y, además, el sujeto memorizó los que habían dado lugar a la

presencia de la nueva señal, así como esta misma; 4) de este modo, pues, se formó una cadena de reflejos basada en la novedad, cosa que continuó hasta que la cadena condujo o bien a la aparición del refuerzo o a la de uno de los estímulos condicionados que estaban inclusos en el sistema de reflejos —referentes al alimento— previamente formado (por ejemplo, A_8): y entonces la totalidad del sistema, constituido sobre la base del reforzamiento por la novedad, se estabilizó inmediatamente.

Era patente, sin embargo, que en la cadena de reflejos quedaban incluidos muchos eslabones superfluos, innecesarios; mas hemos llegado a encontrar un algoritmo que eliminaba este defecto, y que se basaba en el siguiente principio: uno tras otro, los eslabones empezaban a "desprenderse" de la cadena; si ésta se reforzaba, los eslabones no reaparecían, pero si no se aplicaba reforzamiento alguno volvían a presentarse. Así, pues, se observaba algo así como un proceso de selección de los elementos del sistema que correspondían exactamente a las condiciones existentes en el medio externo.

Este estudio de los algoritmos de la actividad cerebral ha permitido hacer un intento de abordar el análisis de la estructura de la retícula nerviosa que se encuentra a la base de las formas complejas de tal actividad (ASHBY, 1958; BRAINES y NAPALKOV, 1959a *y* b; ANDREW, 1959; BRAINES *et al.*, 1959).

En nuestra opinión, las investigaciones mencionadas hacen ver que la aplicación del método de la algoritmización puede conducir a un progreso notable en el estudio del cerebro. Pese a que hasta este momento habían salido ya a la luz cierto número de importantes principios de la tramitación de la información, la falta de una concepción general apropiada y de un método que permitiese apreciar el grado de completud del análisis científico (el método simulativo) ha retrasado el desarrollo de la ciencia. El método de algoritmización hace posible el paso desde la forma accidental de desvelar principios aislados (el de "tentativa y error", el de la "generalización eferente", etc.) a la averiguación de todo el sistema de algoritmos que subyaga a una forma compleja cualquiera de la actividad cerebral, y permite también verificar con precisión el grado de completud del análisis científico y el de crédito que pueda concedérsele. Debido a ello se muestran con toda claridad la significación y lugar de este tipo de indagaciones en el sistema general de la investigación de los mecanismos de la actividad del cerebro; y, además, se han creado así las condiciones precisas para pasar de la investigación de interrelaciones aisladas entre los centros nerviosos al estudio de la estructura global de la retícula nerviosa y a la de elaboración de una teoría armoniosa.

Debido a aplicar el método simulativo tienen que hundirse, sin duda alguna, todas las concepciones sin fundamento que han venido estorbando fuertemente el desarrollo de la ciencia; concepciones que, según HOLST, han conducido, en último análisis, a una descreencia en cualquier inves-

tigación teorética en la esfera de la actividad cerebral y a la adoración de los "puros hechos".

La tendencia que hemos indicado en el campo de las investigaciones está directamente ligada a la solución práctica de diversos problemas médicos urgentes. A este respecto posee una significación decisiva el funcionamiento de los sistemas de regimiento auto-organizadores: cuando la marcha de uno de estos sistemas queda trastornada, se forman nuevos programas de trabajo, que originan y mantienen activamente en ellos la desviación patológica, de modo que la dificultad del tratamiento corrector se debe al carácter activo de estos mecanismos. Y, al parecer, el problema del tratamiento radical de las enfermedades mencionadas sólo se resolverá con éxito cuando encontremos unos métodos adecuados para influir en el funcionamiento de los sistemas mismos de regimiento, problema que asume, pues, una importancia primordial. Pero hasta hace poco tiempo su estudio se ha visto limitado, predominantemente, a averiguar la influencia que ejerce la estimulación de diversos nervios y centros nerviosos, así como la administración de diferentes fármacos que obren sobre la actividad de órganos individuales, y a demostrar la posibilidad de constituir unos reflejos condicionados que estuviesen vinculados al funcionamiento de los órganos internos; y era frecuente que el factor del regimiento se mirase como una mera suma de reflejos condicionados e incondicionados.

Con el desarrollo de la cibernética se ha hecho evidente que semejantes maneras de enfocar el estudio de los procesos de regimiento de los organismos vivos son insuficientes (ASHBY, 1958; KILBURN *et al.*, 1959; GELERNTER, 1960). En particular, las indagaciones que hemos descrito más arriba patentizan que el funcionamiento de los sistemas de regimiento de los organismos vivos tiene un carácter sumamente complejo, que no cabe reducir a mera suma de reflejos. Con objeto de resolver el problema de los mecanismos de regimiento que gobiernan la actividad de los órganos internos es igualmente necesario estudiar el complejo sistema de los algoritmos de los diversos niveles y analizar las intrincadas estructuras de la retícula nerviosa. A menudo se necesita, además, un análisis complejo de la tramitación de la información que abarque tanto el organismo como el medio externo, y es posible que en este aspecto resulte útil la aplicación de los métodos de indagación arriba mencionados.

Hemos hecho un intento de resolver este problema. Para ello hemos partido de la teoría de LANG y MIASNIKOV (1951) (BRAINES y NAPALKOV, 1959a *y* b; BRAINES *et al.*, 1959c) referente al decisivo papel de la traumatización psíquica en la formación de la hipertensión: según estos científicos, la elevación del nivel de tensión sanguínea suscitada por las emociones del miedo o del furor constituye un fenómeno de adaptación, pero, como resultado de sufrir un trauma psíquico repetida y prolongadamente, este mecanismo protector se convierte en la causa fundamental de la

hipertensión. Nosotros hemos intentado analizar este problema reproduciendo experimentalmente en perros el estado hipertenso. Los primeros experimentos que realizamos copiaban directamente la teoría de LANG y MIASNIKOV: inducíamos una traumatización prolongada y repetida creando condiciones que pudieran provocar las emociones del miedo y la furia en los perros experimentales. Con esta finalidad estimulamos repetidamente a los animales mediante una corriente eléctrica, tiramos súbitamente de las correas mediantes las cuales estaban sujetos al techo de la cámara experimental, utilizamos destellos luminosos, disparamos con pistolas de juguete, etc.; como resultado de la aplicación de estos "extraordinarios" estímulos, el nivel de tensión de la sangre de los perros subió de 30 a 50 mm, y quince minutos después bajó de nuevo al nivel normal; aplicando repetidamente los mismos estímulos, el incremento resultante de presión sanguínea se hizo cada vez menos pronunciado, y tras 20 a 30 aplicaciones no se observó elevación alguna de la tensión. Así, pues, no quedó corroborada la hipótesis en su forma simple: los mecanismos reguladores internos demostraron ser firmes y no podían ser la causa fundamental de la formación de un estado patológico del organismo.

Sólo fuimos capaces de reproducir el modelo biológico de desarrollo patológico cuando provocamos un trastorno en los algoritmos de tercer nivel de los sistemas auto-organizadores; en este caso pudimos observar la formación de nuevos mecanismos de regulación, que originaban una elevación estable de la presión sanguínea.

El trastorno de los algoritmos se logró del modo siguiente. Tras una aplicación única de uno de los estímulos "extraordinarios" mencionados (por ejemplo, la estimulación por medio de una corriente eléctrica) lo excluimos absolutamente de los experimentos subsiguientes, y empleamos en lugar suyo, exclusivamente, los estímulos condicionados que anteriormente habían estado unidos a la señal "extraordinaria" (por ejemplo, un metrónomo, un destello con una bombilla eléctrica blanca, etc.). Aplicamos luego repetidamente, con intervalos de tres a cinco minutos y sin reforzamiento alguno, estos últimos estímulos: la primera aplicación produjo un aumento de tensión sanguínea de 30 a 40 mm en los cinco perros, y tras ella la intensidad de la reacción a la aplicación del estímulo continuó creciendo; la sexta y séptima vez de elevación al máximo de tensión llegó a 50-60 mm, proceso que continuó asimismo durante los días consecutivos, de modo que pronto la presión sanguínea subió a 190-230 mm; pero ni siquiera aquí se llegó al límite, sino que el estado de hipertensión de los perros experimentó aún un aumento: por ejemplo, a lo largo de un período de diez días, la presión sanguínea del perro "Chan", que anteriormente se había mantenido en forma estable al nivel de 130/90 mm de Hg, ascendió en estas condiciones hasta 250/160 mm (el numerador

denota el nivel de la presión máxima de la sangre y el denominador el de la mínima). En el caso de la perra "Belka" se observaron los cambios de presión sanguínea transcritos en la tabla I.

TABLA I

TENSION SANGUINEA DE LA PERRA «BELKA»

Fecha	*Tensión en mm. de Hg*
27/V	160/95
28/V	180/120
29/V	180/120
31/V	190/125
2/VI	200/132
3/VI	220/140
15/VI	220/140
15/VII	220/140

Los estados hipertensivos persistieron en los perros durante muchos meses (el período de observación fue de un año y cuatro meses); la presión sanguínea no descendió ni siquiera tras haberse excluido a los animales de los experimentos durante cinco meses (período durante el cual se los retuvo en la perrera).

El análisis de los factores que dieron origen al desarrollo de semejante estado patológico ha hecho ver que fue debido a la formación de unos programas nuevos y patológicos para el nivel de la presión sanguínea, programas de regimiento en los que, según pudo observarse, estaban incluidas un número considerable de señales exteriores que provocaban una elevación prolongada y estable de la tensión (como muchas de ellas estuvieron presentes en el medio circundante durante largo tiempo, se produjo una estabilización del nivel patológico).

El origen de la formación de los nuevos programas de regimiento fue el trastorno producido en los algoritmos de los sistemas de regimiento auto-organizadores. En las condiciones normales, la regulación del nivel de la presión sanguínea se apoya en un programa que incluye tanto señales interoceptivas como exteroceptivas (sistema de los reflejos condicionados); estos programas se constituyen a base de algoritmos de segundo nivel: en las condiciones ordinarias, estos últimos hacen que se formen los programas de regimiento que son útiles para el organismo (los algoritmos garantizan la selección de una información digna de crédito y necesaria). El funcionamiento de este sistema descansa en los principios indicados anteriormente, tales como el de la combinación reiterada de dos señales como base del reforzamiento, el del reforzamiento reiterado, etc.

Mas existen algoritmos de tercer nivel que modifican a los del segundo; por ejemplo, en caso de que un peligro amenace la vida del animal, los algoritmos cambian de actividad y garantizan una formación extremadamente rápida de los mecanismos reguladores que se encaminan a impedir la destrucción del organismo.

Los programas de tercer nivel que determinan el cambio de funcionamiento de los algoritmos del segundo desempeñan un papel de adaptación, pero en caso de que se desvíen de un modo muy prolongado pueden servir de fundamento para la formación de nuevos mecanismos de regimiento patológicos.

Esto es lo que se observó con toda precisión en nuestros experimentos. Los algoritmos usuales de segundo nivel de la actividad cerebral quedaron trastornados en los animales sometidos a experimentación, y se formaron muy rápidamente unos sistemas nuevos y patológicos de reflejos condicionados ligados a la elevación de la presión sanguínea: bastó una sola combinación de una señal nueva con un estímulo condicionado para que se suscitasen los nuevos reflejos condicionados, y el efecto resultante (a saber, el aumento de la tensión) no se extinguió ni siquiera tras 900 aplicaciones sin reforzamiento de la combinación aludida. Habían resultado trastornados el sistema del reforzamiento doble y otros algoritmos (ASHBY, 1958; BRAINES y NAPALKOV, 1959a *y* b; BRAINES *et al.*, 1959c y 1960) que garantizan la formación del comportamiento, y de ello se derivaron la elicitación de unos reflejos condicionados de segundo y tercer orden y la formación de nuevos programas de funcionamiento (por ejemplo, los de regimiento), sin que mediase ningún reforzamiento debido a un estímulo incondicionado; y estos programas no se extinguieron cuando no hubo reforzamiento.

Los cambios descritos en los algoritmos de la actividad cerebral condujeron a la constitución de un sistema de reflejos condicionados que creció rápidamente y era inextinguible, sistema que originó una elevación estable de la tensión y en el que cada vez se incluían más señales del medio (cosa que contribuyó a que se desarrollase todavía más el estado patológico): bastaba que se introdujese una o dos veces una sola señal de este sistema patológico en las condiciones reinantes en una nueva cámara, extraña para el perro experimental, para que la presión sanguínea de éste presentase un nivel estable de 220/140 mm de Hg.

Así pues, se formaban programas nuevos de regulación de la tensión, cuyo nivel, anormalmente elevado, se mantenía firmemente. El complejo de señales patológicas aumentaba continuamente, y debido a ello el altísimo nivel de la presión sanguínea podía mantenerse durante la mayor parte del día.

Hemos estudiado diversas maneras de tratar experimentalmente semejante estado, y sólo han resultado eficaces las que conducen a una modi-

ficación de los algoritmos del cerebro; en los demás casos (por ejemplo, cuando se administraban sustancias medicinales) únicamente se conseguían resultados transitorios. Hemos comprobado también la diferencia existente entre el efecto producido por medicinas cuando se las aplicaba sobre el trasfondo de la acción de los estímulos condicionados patológicos y el que se obtenía en ausencia de tales estímulos: en el primer caso, el efecto terapéutico era mejor.

Es preciso subrayar que solamente cabe averiguar cuáles son los mecanismos del estado patológico que hemos descrito cuando se considera el sistema entero, incluidos tanto el organismo como el medio externo: un estudio aislado de aquél puede no desvelar las causas de la enfermedad, y no ayudará a encontrar un tratamiento eficaz.

Por lo tanto, el método de la algoritmización tiene gran importancia para el estudio de la causa de algunas enfermedades; mas es necesario someter a consideración, completo, el complejo panorama del sistema de regimiento y analizar los cambios que tienen lugar en los algoritmos de los diversos niveles. Asimismo es muy importante no sólo tener en cuenta los procesos que acontecen en el organismo, sino también los correspondientes al medio externo.

El tratamiento en condiciones clínicas, en las que las señales exteriores están ausentes y, en consecuencia, no pueden manifestarse formas patológicas de regimiento, lleva a resultados favorables temporales; mas en cuanto el paciente vuelve a sus condiciones de vida habituales, en las que se restaura el sistema patológico de circulación de la información que se había cerrado anteriormente y se manifiesta plenamente el funcionamiento de los sistemas patológicos de regimiento, la enfermedad —por ejemplo, la hipertensión— reaparece. Al parecer, durante el tratamiento tiene más importancia influir sobre el nuevo sistema patológico de regimiento que conseguir una disminución temporal de la presión sanguínea valiéndose de medicamentos.

Estos hechos reflejan sólo un caso particular que sirve de ilustración de ciertos principios generales.

En la formación de ciertas enfermedades (tales como la angina de pecho, el asma bronquial y algunas otras), la constitución de sistemas patológicos de regimiento que incluyan estimulaciones procedentes de los interoceptores como señales patológicas (por ejemplo, la formación de ácido láctico cuando cambie la concentración de azúcar en la sangre) desempeña un papel esencial; y los principios que subyacen a la constitución y funcionamiento de tales sistemas son idénticos a los mecanismos patológicos que hemos descrito. Estas formas patológicas de regimiento son también resultado de perturbaciones en la marcha de los sistemas auto-organizadores, las cuales llevan a la formación de programas nuevos, patológicos, del funcionamiento de los mecanismos de regimiento.

Hemos estudiado la constitución de algunos de estos programas que regulan el nivel de azúcar de la sangre, hemos visto que bajo la acción de una señal a lo largo de varias horas se llega a formar un complejo programa de cambios de aquel nivel y hemos indagado cuáles podrían ser las leyes que gobiernan la constitución de estos complejos sistemas de reacciones reflejas.

Los sistemas de regimiento auto-organizadores desempeñan un papel particular en el desarrollo de las enfermedades: en tanto que las perturbaciones del funcionamiento de los mecanismos innatos de regimiento suelen ser de un carácter limitado y se las elimina rápidamente en cuanto se produzca una modificación de las condiciones desfavorables, cualquier trastorno del funcionamiento de los mecanismos auto-organizadores lleva a la formación de nuevas formas de regimiento patológicas, que pueden funcionar en el organismo de modo persistente y prolongado incluso tras la desaparición de las influencias externas desfavorables.

El estudio de los sistemas de regimiento auto-organizadores adquiere gran importancia para la ciencia médica: cuando se someten las enfermedades a tratamiento es necesario contar con que existan sistemas de regimiento patológicos y ser capaz de influir activamente en ellos, en vez de limitar el tratamiento terapéutico a factores secundarios aislados, y cuando se analizan las causas de las enfermedades importa mucho conocer los algoritmos de los sistemas auto-organizadores, así como el carácter de los trastornos de tales algoritmos que llevan a la constitución de formas patológicas de regimiento; ello es lo único que nos permitirá encontrar medios terapéuticos eficaces.

Los resultados conseguidos por la moderna cibernética pueden redundar muy favorablemente en la fisiología y en la medicina.

RESUMEN

Hemos estudiado la tramitación de la información en lo que respecta al estudio del cerebro, en especial para el programa de la hipertensión, y hemos expuesto un resumen, un intento de analizar algunas formas complejas de la actividad cerebral sobre la base de un estudio de los procesos que efectúan aquella tramitación.

La presente comunicación se ocupa principalmente de presentar datos experimentales vinculados a la elaboración de nuevos métodos de tratamiento terapéutico; estos métodos, que se apoyan en el estudio de los procesos citados, se han sometido a prueba en perros en los que se había inducido experimentalmente una hipertensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANDREW, A. M. (1959): Learning Machines. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Stationery Office (p. 475).

ASHBY, W. ROSS (1956): Proyecto de un amplificador de inteligencia. *Colección Automata.* Moscú, Editorial de bibliografía extranjera.

ASHBY, W. ROSS (1958): La aplicación de la cibernética a la biología y a la sociología. *Voprosy Filosofii, N. 12,* 110-117.

BRAINES, S. N., y NAPALKOV, A. V. (1959a): La cibernética y algunos problemas de psiquiatría. *Colección Problemas de patología experimental.* Moscú, Academia de Ciencias médicas de la U. R. S. S.

BRAINES, S. N., y NAPALKOV, A. V. (1959b): Algunas cuestiones de la teoría de los sistemas auto-organizadores. *Voprosy Filosofii, 6,* 148-154.

BRAINES, S. N., NAPALKOV, A. V., y SCHREIDER, I. A., (1960): Analysis of the working principles of some self-adjusting systems in engineering ad biology. *Information Processing.* Proceedings International Conference on Information Processing UNESCO (ICIP), París, junio 1959 (pp. 362-371).

BRAINES, S. N., NAPALKOV, A. V., y SVECHINSKY, V. B. (1959c): Problemas de neurocibernética. Moscú, Academia de Ciencias médicas de la U. R. S. S.

FEIGENBAUM, E. A. (1961): The Simulation of Verbal Learning Behavior. *Proceedings Western Joint Computer Conference, 19,* 121-132.

GELERNTER, H. (1960): Realization of a geometry theorem proving machine. *Information Processing.* Proceedings International Conference on Information Processing UNESCO, París (pp. 273-282).

KILBURN, T., GRIMSDALE, R. I., y SUMMER, F. H. (1959): Experiments in machine learning and thinking. *Information Processing,* Londres, Butterworth (pp. 303-309).

MIASNIKOV, A. L. (1951): El papel de las perturbaciones de la actividad nerviosa superior en el desarrollo de la hipertonía. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deyatelnosti, 1,* 99-104.

NAPALKOV, A. V. (1958): Estudio de las leyes para formar sistemas complejos de reflejos condicionados. *Vestnik Moskovskovo Universiteta, 2,* 75-79.

NAPALKOV, A. V., y SHTILMAN, E. V. (1959): Estudio de formas complejas de la actividad cerebral analítico-sintética. *Vestnik Moskovskovo Universiteta, N. 39,* 57-83.

NEWELL, A., y SHAW, I. C. (1958): Elements of theory of human problem solving. *Psychological Review, 65,* N. 3.

PASK, G. (1961): The cybernetics of evolutionary processes and self-organising systems. Proceedings 3rd Congress of the International Association of Cybernetics, Namur, 1961.

PAVLOV, I. P. (1956): *Obras completas.* Moscú, Editorial médica estatal.

REITMAN, R. W. (1961): Programming intelligent problem solvers. *IRE Transactions of the Professional Group on Human Factors in Electronics, 2,* N. 1.

WIENER, N. (1958): *Cibernética.* Moscú, Editorial de la radiodifusión soviética.

La información y el cerebro

Por JIRÍ ZEMAN

LA ESCRITURA CEREBRAL

Un proceso unificador de todos los campos de la actividad humana, incluyendo las comunicaciones por medio del habla y la sistematización de la información, posee una importancia enorme para el desarrollo de la sociedad. Aparte de las conocidas tentativas de crear lenguajes artificiales internacionales, tales como el esperanto, existen ciertos intentos, no menos significativos para la sociedad moderna, de crear un lenguaje universal científico que permitiese vincular más estrechamente y unificar diferentes ramas de la ciencia, uniformar la expresión, tramitar mejor la información y centralizar las investigaciones. Se trata de un empeño que ofrece actualmente un futuro muy prometedor gracias a la cibernética, a las matemáticas y a la teoría de la información, las cuales, en cooperación con la fisiología, la lingüística y la psicología, podrían dar origen a trabajos muy fructíferos.

Los métodos hasta ahora existentes se han ocupado principalmente, y siguen ocupándose todavía, del aspecto formal del habla: la lógica matemática y el análisis del lenguaje lógico (semiótica) analizan la estructura lógica del pensamiento y del lenguaje y crean sistemas generales de símbolos para expresar aquella estructura lógica y semejantes operaciones lógicas; sin embargo, pasan por alto el aspecto cualitativo, no consideran el contenido ni abarcan toda la riqueza de la realidad —aun cuando la semántica se dedica también al problema de la relación entre el símbolo y el significado—. El aspecto del contenido del habla no se trata ni por la teoría de los lenguajes informativos y los sistemas de codificar (teoría de la traducción mediante máquinas) ni por la de las retículas o circuitos neurales, que lleva a cabo un intento muy significativo de combinar los métodos de la lógica matemática con los de la neurofisiología; todo lo que se incluye en ello son modelos formales de operaciones lógicas, estructuras lógicas y sistemas de símbolos.

El intento de apresar el aspecto del lenguaje correspondiente al contenido y a su expresión exacta podría proceder, en cierto modo, a partir de

la historia de los experimentos relativos a la escritura conceptual o ideografía. Los experimentos que hasta ahora se han realizado no podían surgir de un conocimiento de la fisiología cerebral, pero merecería la pena de estudiarlos con mayor detalle, con objeto de averiguar de qué forma podrían servir todavía de estímulo para la investigación de hoy y en qué punto eran erróneos. Se recordará que fue LEIBNIZ, en particular, quien, en sus intentos de llegar a una característica universal (una teoría de símbolos), un análisis combinatorio general (o sintaxis lógica) y una enciclopedia general (ciencia unificada), llevó a cabo un esfuerzo por crear un lenguaje y una ideografía universales (también tenemos la obra de DALGARNO, WILKINS, KOMENSKI y otros autores). A este respecto son asimismo dignos de atención los antiguos sistemas de escritura que han existido antes que el sistema fonético, por ejemplo, la antigua escritura china aborigen, o *pa-kwa,* que se derivó de la escritura de nudos y precedió a la escritura pictórica o *ku-wen,* de la que ha salido la escritura china actual. Los símbolos de la *pa-kwa* representaban conceptos básicos, se basaban en la mitología y eran al mismo tiempo expresión de las necesidades prácticas de la navegación: para el hombre primitivo, los fenómenos naturales —el viento, el fuego, el trueno, etc.— eran alegorías de procesos mentales, la imagen mental era una proyección de la realidad efectiva y la expresión verbal se encontraba vinculada directamente a su contenido. Los ocho símbolos *pa-kwa* básicos estaban dispuestos en rosa de los vientos, representaban pares de opuestos, tales como ligero-pesado, frío-cálido, etc., y estaban formados por el principio creador o *yang* y el destructor o *yin* (que se expresaban en su representación gráfica, compuesta de líneas interrumpidas e ininterrumpidas: modo de expresión que, de hecho, está realizado en el sistema binario); combinando estos símbolos se obtenían otros ideogramas.

La consciencia, el pensamiento y el habla reflejan la realidad objetiva. Por ahora sabemos muy poco de su código, pero esto es justamente lo que excita nuestro interés inquisitivo. Ciertas señales específicas, que se transforman en *perceptos,* luego en procesos cerebrales y, por fin, en *receptos* (que somos capaces de descodificar directamente), son las portadoras del contenido informativo de la realidad objetiva reflejada; es verdad que solamente los hechos cognoscitivos nos son directamente accesibles (y cabe observarlos por introspección), pero la ciencia no se ha de confinar, sin duda alguna, a la introspección; con objeto de entender cuál es el contenido informativo del último eslabón de la cadena —la consciencia— es necesario entender también su vehículo: las señales y el código cerebrales. Los actos de registrar, tramitar, conservar y transmitir la información en el cerebro se ejecutan en el código informativo, del cual sabemos muy poco por ahora. La desconocida escritura cerebral, la que las personas tienen en común, con independencia de su nacionalidad y de otras diferencias) se manifiesta, por ejemplo, en el lenguaje hablado y en

el escrito, en la expresión y en el comportamiento global; dicho de otro modo, el habla y la escritura son manifestaciones codificadas de los procesos cerebrales, registros de los procesos de la actividad nerviosa superior del hombre: el analizador del habla se encuentra estrechamente vinculado a los procesos motores de los órganos vocales —en el caso del habla— y de la mano —en la escritura—, así como a los procesos visuales —en la lectura— y auditivos —en el escuchar—; está vinculado, pues, a cierto número de analizadores sensoriales y, por estar así unido a los órganos exteriores, se halla en contacto con la realidad exterior, a la que ayuda a reflejar y, al fin y al cabo, asimismo a cambiar. También los procesos fisiológicos, psíquicos y lingüísticos portadores de contenido informativo se manifiestan de cierta manera física: *verbi gratia,* en los registros electroencefalográficos de las ondas cerebrales o en las ondas acústicas del habla. Cuando se escucha hablar, las vibraciones del tímpano se transforman en procesos nerviosos que llevan la información a la consciencia; y la información de ésta puede, a través de procesos nerviosos eferentes, convertirse en vibraciones de las cuerdas vocales. Así pues, la información de la consciencia puede hacerse patente objetivamente y volverse susceptible de ser percibida por los sentidos.

Los procesos psíquicos no sólo están vinculados a procesos fisiológicos del cerebro, sino también a hechos de naturaleza física. Por consiguiente, con objeto de crear un lenguaje universal es necesario emplear hechos procedentes de los campos: 1) de la psicofisiología, 2) de la lingüística y 3) de la teoría de la información. Los hechos de estos campos son simultáneamente de índole física y matemática; así, una señal que la teoría de la información estudie como portadora de información es un fenómeno físico y cabe especificar matemáticamente la información que lleve; un proceso mental que la psicofisiología examine como portador de algún contenido psíquico presenta, entre otras, propiedades físicas (por ejemplo, fenómenos eléctricos), y se puede tomar el contenido psíquico como una información asimismo capaz de ser expresada matemáticamente; y una expresión lingüística, que esta ciencia estudia como portadora de cierto contenido de significado, posee también unas propiedades físicas —así, acústicas— y es posible examinar matemáticamente su contenido en cuanto información. Desde este punto de vista, cabe mirar los objetos a que atienden la teoría de la información, la psicofisiología y la lingüística al mismo tiempo como fenómenos de naturaleza física (energética) y matemática (informativa): están involucradas, en efecto, unas señales físicas portadoras de cierta información matemática, y toda información posee cierta característica probabilitaria, crea determinado campo probabilístico en el espacio informativo de la fuente o del receptor; por lo tanto, la señal constituye un fenómeno ondulatorio y es susceptible de ser analizada

como célula informativa cuyas dimensiones sean la frecuencia, la amplitud y el tiempo; y a esta señal corresponde en psicofisiología un proceso fisiológico cerebral, como a la información corresponde el contenido psíquico transportado por semejante proceso, coordinado con él y transformado a partir de él en un hecho determinado de conciencia. En la lingüística, análogamente a la expresión lingüística, que consta de unos procesos físicos, se le coordina cierto contenido informativo.

Planteamos la cuestión de cómo expresar y pintar la información de nuestro cerebro —la desconocida escritura cerebral—, de tal manera que sea universal y apropiada para distintos campos de la ciencia. Es posible proceder de tres maneras diferentes: 1) examinando las expresiones del cerebro (fisiológicas y de otra índole), según se hace, por ejemplo, en la electroencefalografía; 2) estudiando las expresiones del habla (acústicas y de otra índole), tal como hace, por ejemplo, la fonética, y 3) creando modelos físico-matemáticos del contenido intelectual del habla.

Es preciso no perder de vista que la información que hay en el cerebro es sumamente compleja y que, en realidad, abraza la totalidad del mundo. Un lenguaje universal habría de ser, por consiguiente, parecidamente complejo y comprehensivo.

LOS CAMPOS CEREBRALES

El profesor WIENER ha señalado la posibilidad de poner en conexión ciertos hechos fisiológicos —las ondas cerebrales— con el análisis armónico. La compleja vida colectiva de las células corticales se refleja en las distintas frecuencias que se combinan, dando las curvas encefalográficas, y cabe observar —y registrar en el electroencefalograma— las diferencias en tales frecuencias que se encuentran entre individuos distintos y entre estados mentales distintos; las diferencias así registradas, sin embargo, son hasta el momento muy pequeñas, y en principio no podemos apreciar a partir de ellas otra cosa sino que la persona con la que se lleve a cabo el experimento está dormida, despierta, excitada, etc. Por tanto, esta dirección de la investigación depende en gran medida de los perfeccionamientos que se realicen en neurofisiología y en encefalografía; no obstante lo cual, es cierto que estas manifestaciones de la escritura cerebral —los electroencefalogramas—, pese a poseer una plasticidad muy reducida en cuanto a su contenido, no son meramente signos convencionales, tales como las letras del alfabeto; mas, por desgracia, aún se sabe muy poco acerca de la relación entre [su] forma y contenido.

También en la fonética es posible expresar de manera luminosa los

procesos cerebrales transformados, pues en tal ciencia cabe registrar las ondas sonoras del habla. El "lenguaje visible" constituye un perfeccionamiento de este método; mediante un equipo especial se transforman los sonidos del habla en formas ópticas; dicho de otro modo, se transforman unos fenómenos temporales en espaciales y gráficos. También aquí, como ocurría con los electroencefalogramas, quedan involucradas expresiones de la escritura cerebral que no son meramente signos abiertamente convencionales, como las letras, sino transformaciones directas de los procesos cerebrales a través del medio de los órganos vocales; y, sin embargo, son todo menos universales, puesto que los sonidos con que se habla están en relación con las lenguas nacionales respectivas, y las manchas de las palabras en el "lenguaje visible" son diferentes, por ejemplo, para el francés y el alemán, etc. Una vez más, la relación entre forma y contenido presenta un problema.

En la antigua escritura pictográfica, la forma está estrechamente relacionada con el contenido (como ocurre, *verbi gratia,* con un pájaro pintado): denota directamente, como una señal, el objeto dado. Esta escritura gráfica, basada en el mundo sensorial, es, sin embargo, insuficiente cuando se exigen abstracción y generalidad: el pensamiento y el habla tienen que basarse en el lado positivo de limitar la variedad. La expresión por medio de la pictografía está sometida a los sentidos y a la realidad exterior, pero no al pensamiento ni al transformador sujeto humano; mas una expresión eficaz por medio de la escritura cerebral tiene que combinar lo gráfico con lo general, lo concreto con lo abstracto.

La expresión por medio de la escritura cerebral tiene que ser una expresión gráfica de un asunto no gráfico, una transformación de fenómenos temporales en algo registrado espacialmente. Mientras se forman los conceptos y adquirimos experiencia, en el cerebro se forman ciertas estructuras de una naturaleza fisiológica más o menos desconocida (en realidad, determinados campos cerebrales de excitación); STAGNER y KARWOSKI citan en su *Psicología* la opinión sustentada por varios psicólogos y neurólogos según la cual es posible que los estímulos exteriores e internos influyan en la formación de campos cerebrales en el sensorio de una manera semejante a como un campo magnético que varíe hace que unas limaduras de hierro se dispongan en figuras diferentes; y la experiencia, pues, daría origen en el cerebro a ciertos campos, dotados de una distribución específica de puntos de excitación, que, por ser configuraciones preparatorias, nos influirían en cuanto a la percepción y el pensamiento. También podría emplearse una analogía con las figuras del sonido de Chladni: si hacemos —por ejemplo, con un arco— que vibre una placa de latón espolvoreada con arena muy fina, ésta se dispone en figuras distin-

tas; dicho de otra forma, las vibraciones temporales se convierten en formas.

La teoría de SEMON y UCHTOMSKI parte del carácter ondulatorio de la actividad cerebral (ya Diderot se valió de una analogía con la música en su explicación de la vida psíquica: según él, el pensamiento es la suma de las percepciones, exactamente lo mismo que el sonido y la melodía se componen de cierto número de vibraciones de la cuerda). SEMON ha ideado una teoría de los procesos psíquicos apoyada en las vibraciones y la resonancia: según este autor, la percepción consiste en la transmisión de cierta vibración por el tejido nervioso, vibración que deja en la memoria una impresión, una huella llamada engrama, que puede ser transformada de nuevo —en el acto de recordar— en vibraciones bajo la influencia de un estímulo parecido; algo así como una cuerda emite un sonido cuando actúan sobre ella las ondas sonoras de la misma frecuencia que aquel sonido. Y los fenómenos psíquicos complejos (asociación, sentimientos, pensamiento) se originan, según SEMON, al crearse formaciones unisonantes de acuerdo con los principios de la homofonía. Se trata, realmente, de una especie de teoría musical de los procesos psíquicos, que delega en la memoria una función algo semejante a la de un disco de gramófono.

También el fisiólogo UCHTOMSKI se vale de ciertos conceptos de la teoría ondulatoria. Según este autor, en el cerebro existen focos de excitación muy crecida —dominantes —que poseen un umbral de estimulación muy bajo y constituyen lugares de fácil formación de conexiones; son centros dotados de cierto ritmo, que resuenan fácilmente bajo el efecto de estímulos con otro igual o parecido; y la vida espiritual entera está gobernada por estos campos cerebrales, que se componen entre sí y tienen niveles diferentes de energía de excitación.

Puede suponerse que el registro de información en el cerebro acontece a base de la formación de campos cerebrales de excitación, en donde los procesos temporales se convierten —y fijan— en una forma determinada, esto es, en una distribución específica de puntos y grados de excitación. Al parecer, tales campos están vinculados a fenómenos ondulatorios de ciertas frecuencia y amplitud, y se afectan mutuamente de acuerdo con los principios de la teoría ondulatoria (sería improbable que los procesos cerebrales no tuvieran ninguna relación con los fenómenos ondulatorios): mas, con todo, los procesos que acontecen en el cerebro se confinan dentro de él mismo, y no pueden transmitirse de una manera parecida, por ejemplo, a la de las ondas electromagnéticas: únicamente les es posible convertirse, mediante los impulsos eferentes, en actividad de los músculos, de los órganos vocales, etc. A cada campo cerebral le corresponde cierta energía de excitación y un contenido informativo específico, al que podríamos caracterizar como su espectro semántico específico; y los espectros semánticos de los campos citados pueden combinarse y mez-

clarse de muchas maneras distintas. El centro del campo posee un grado muy elevado de probabilidad de activación y de definición semántica; hacia afuera, aquel grado decae, y aunque el número de puntos de excitación aumenta, se van haciendo cada vez más débiles; por fin, la periferia está caracterizada por una indefinición semántica, una vaguedad y una entropía mayores.

ANALISIS ARMONICO DE LA INFORMACION SEMANTICA DE LOS CONCEPTOS Y LOS ENUNCIADOS

Las vibraciones de la corteza cerebral, en la que tienen lugar los procesos del pensamiento, se codifican en vibraciones de los órganos vocales, y éstos, a su vez, se transforman en vibraciones acústicas; así pues, el habla es la manifestación externa del pensamiento, una forma con contenido físico que está vinculada, sobre todo, con el aspecto técnico de la información, en tanto que la consciencia se vincula con su aspecto semántico. Podemos suponer razonablemente que los procesos cerebrales están ligados a diversos fenómenos de resonancia y vibración, rítmicos y ondulatorios, y que están sometidos a los principios de la composición y propagación de ondas, así como a otros principios de la teoría ondulatoria. Exactamente del mismo modo que las excitaciones de los diversos puntos de la retina se componen entre sí, dando una excitación del nervio óptico, que estas excitaciones hacen lo mismo y dan lugar a una sensación, y que las sensaciones originan análogamente una percepción, podemos suponer que en el cerebro la variedad existente de ciertos microprocesos es limitada y que lleva a su transformación en macroprocesos pertenecientes a los campos de la fisiología, de la psicología o del conductismo. Las vibraciones cerebrales no se transmiten directamente, sino que se transforman en manifestaciones lingüísticas y de la conducta; y, por consiguiente, los campos cerebrales de los distintos individuos no se forman mediante ningún tipo de transmisión directa, telepática, sino por una actividad gradual —aunque esforzada— en los procesos del estudio, de la enseñanza y formación, de la comunicación hablada y de la interacción ideológica: las pautas básicas del cerebro se heredan en forma de una serie hereditaria de reflejos incondicionados, estereotipos dinámicos y focos dominantes básicos, mientras que los demás conceptos científicos y morales principales de la sociedad se adquieren a lo largo del proceso de constitución de los campos cerebrales en los individuos humanos. La información directa de que disponemos acerca del carácter de estos campos, que son portadores de la información semántica de nuestros conceptos y enunciados, es insuficientísima; y la que existe se recoge con ayuda de los encefalogramas, los análisis del habla y otros expedientes semejantes.

Partamos de las siguientes tesis: 1) el análisis armónico se encuentra perfectamente desarrollado y constituye un medio de expresión preciso y dilúcido; 2) el análisis de los electroencefalogramas y de los sonidos del habla proporciona una información suficiente sobre el contenido informativo del pensamiento, y 3) suponemos que la información cerebral está vinculada a ciertos procesos ondulatorios.

De ello se sigue la siguiente posibilidad de examinar y expresar la escritura cerebral: cabe emplear el análisis armónico y otros métodos de las matemáticas superiores para el análisis del aspecto del contenido del lenguaje y su aplicación; es decir, cabe coordinar ciertas ondas con ciertos conceptos y enunciados, con lo que se tienen modelos de la escritura cerebral para expresar la información semántica y su sistematización.

Cuando se tiene en cuenta la lógica matemática que ha surgido de la aplicación del álgebra a la lógica formal, parece sin duda conveniente aplicar las matemáticas superiores al contenido (al aspecto semántico del lenguaje y del pensamiento), sin dejar de utilizar al mismo tiempo los hechos que la psicofisiología nos ha dado a conocer. La escritura universal o conceptual nos debería facilitar una tramitación de la información más precisa y más comprehensiva mediante el análisis matemático de textos complejos (así, de manifestaciones psicopatológicas), y hacernos posible la asociación de conceptos isomorfos, la creación de conceptos nuevos, etc.

Si los procesos cerebrales tienen carácter ondulatorio, es posible aprehender en ellos ciertas funciones periódicas, que cabe resolver por análisis armónico en series de Fourier. Podemos coordinar experimentalmente ciertos tipos de ondas con ciertos contenidos del pensamiento (categorías, conceptos, enunciados) que podrían considerarse modulaciones diferentes de la onda portadora fundamental (la cual podría ser, por ejemplo, un espectro de ruido, complejo e irregular, o bien, por el contrario, una onda sinusoidal simple); y podríamos coordinar a la función de la onda portadora una cantidad de información inicial o de contorno —ya fuese pequeñísima o muy grande—: la categoría de ser en sentido semántico, es decir, la de realidad.

En sentido gnoseológico, los conceptos y enunciados individuales son reflejos de la realidad objetiva, y únicamente contienen —e incluso acentúan— algunos aspectos de ella: constituyen factores de limitación de su variedad, de su espectro semántico (que podría corresponder a un ruido "blanco"). Toda formación lingüística portadora de pensamiento (concepto, frase, texto) posee, además de su expresión formal, cierto contenido semántico objetivo —es portadora de cierto significado—; este contenido significativo no es jamás absolutamente simple, y cabe considerarlo como un espectro semántico que abarcaría diversos componentes; su base fisiológica está constituida por determinado foco cerebral conectado con la

compleja retícula neural, y podemos suponer que sus componentes semánticos sean los componentes armónicos de tal espectro. Hay formaciones que tienen espectros parecidos, si bien la semejanza puede ser solamente superficial, formal (*v. g.*, acústica, homonímica), o basarse en el contenido (semántica, sinonímica); por ejemplo, las palabras "*moon*" y "*lune*" están dotadas de un espectro semántico muy análogo. Una serie de palabras al azar tiene sólo la apariencia exterior de una frase, pues carece de sentido —se han colocado juntas palabras de espectros semánticos sintácticamente disonantes—. Los espectros semánticos pueden mezclarse de modos muy variados; así ocurre, por ejemplo, que se crean palabras híbridas, formaciones nuevas, etc. (*v. g.*, las vagas formaciones semánticamente ambiguas inventadas por el poeta Morgenstern); toda formación lingüística es sólo un núcleo inserto en el complejo campo semántico de las asociaciones y posee cierto grado de indefinición, de entropía: todo componente de una frase tiene cierta dispersión semántica, cierta indefinición (una frase a la que falten palabras y un texto al que falten frases pueden completarse de formas diversas).

En los procesos del pensamiento —ya se expresen o no en el habla— se conectan entre sí, sobre la base de determinada correlación o semejanza, unos focos cerebrales, cuyos espectros semánticos específicos poseen ciertas características probabilísticas; si se refuerzan en virtud de algún estímulo apropiado transmiten las ondas a las regiones vecinas (aquí es aplicable, probablemente, el principio de Huygens de la propagación de las ondas), y los espectros semánticos se componen entre sí de modos diversos. Estos procesos presentan sus matices en tipos distintos de personas: el tipo poético, por ejemplo, cuenta con espectros semánticos más ambiguos y menos definidos y nítidos que el científico.

Los conceptos semejantes tienen, al parecer, espectros de naturaleza semejante, y sus ondas presentan diferencias sólo minúsculas en cuanto a fase, amplitud o frecuencia. Los conceptos ricos en asociaciones, ambiguos, indefinidos (pero no vacíos desde el punto de vista informativo), parecen mostrar cierta semejanza con los espectros de ruido complejos; y, por otra parte, los conceptos generales, vagos, casi vacíos informativamente, poseen espectros simples (no compuestos, regulares). El concepto arriba mencionado de *ser* podría tener, dado su elevado carácter de generalidad, un espectro muy sencillo; pero si, en cambio, se lo entiende como comprehensor virtual de todo, su espectro habría de tener la máxima complejidad.

Adoptemos el sencillo modelo siguiente de diccionario: tenemos un término general, *X*, que comprende los conceptos *A, B, C, ...*; el concepto *A* comprende los conceptos —menos generales— *k, l, m, ...*; el concepto *k* comprende los *r, s, t, ...*, etc.; no obstante lo cual, el concepto *r* tiene un contenido más rico que el *k*, que lo comprende, y una relación análoga existe entre *k* y *A*, así como entre *A* y *X* (por ejemplo,

X podría significar "intelectual"; *A*, artista; *k*, artista gráfico, y *r*, pintor; e igualmente podrían entrar en juego enunciados, como ocurriría si *X* fuese "El señor P. es un intelectual", etc.). Podríamos pintar los conceptos dados como ondas que representasen funciones periódicas resolubles en series armónicas de Fourier, en las que M_0 fuese la componente constante, M la amplitud, ω la frecuencia angular, t el tiempo, φ la fase y T el ciclo (ω es igual a $2\pi/T$); entonces, las líneas onduladas individuales denotadoras de los conceptos representarían las siguientes funciones:

$$X\text{: } f(x_1) = M_0 + M_1 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1)$$

$$A\text{: } f(x_2) = M_0 + M_1 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + M_2 \operatorname{sen}(2\omega t + \varphi_2)$$

$$k\text{: } f(x_3) = M_0 + M_1 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + M_2 \operatorname{sen}(2\omega t + \varphi_2) + M_3 \operatorname{sen}(3\omega t + \varphi_3)$$

$$r\text{: } f(x_4) = M_0 + M_1 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + M_2 \operatorname{sen}(2\omega t + \varphi_2) + M_3 \operatorname{sen}(3\omega t + \varphi_3) + M_4 \operatorname{sen}(4\omega t + \varphi_4) = M_0 + \sum_1^4 M_4 \operatorname{sen}(4\omega t + \varphi_4).$$

(En realidad, naturalmente, tales funciones serían mucho más complejas, puesto que el sistema de las palabras es mucho más complicado que el correspondiente al sencillo modelo que hemos descrito.)

Apoyándose en una estrecha vinculación entre la fisiología cerebral, las matemáticas y la lingüística, sería posible constituir por este método unos modelos matemáticos de la escritura cerebral que nos permitirían gradualmente representar de un modo mejor y con mayor uniformidad el mundo objetivo (incluido su reflejo subjetivo en la mente humana). Desde luego, no sería una tarea fácil: para llegar a averiguar los espectros fundamentales de las categorías, de los conceptos y del lenguaje en su conjunto se necesitarían vastos y combinados esfuerzos de lingüistas, matemáticos, fisiólogos, psicólogos, físicos, filósofos, etc.; pese a ello, nos parece que de este modo podría encontrarse una vía para la creación de un lenguaje y una escritura universales, generales, sobre una base estrictamente científica; lenguaje que podría constituir el fundamento para la unificación de las ciencias, para la sistematización compleja de la información científica, etc., y que abriría posibilidades insospechadas para el desarrollo ulterior del conocimiento humano.

RESUMEN

Los intentos de preparar un lenguaje científico universal no deberían desdeñar el aspecto del contenido del lenguaje y tendrían que acoger la historia de los símbolos de la escritura (la antigua escritura china *pa-kwa*, Leibniz, etc.). Las traducciones lingüísticas con máquinas informatorias, la teoría de retículas neurales y la lógica

matemática acentúan en primer lugar la forma del lenguaje, frente a su contenido. Los procesos de registro, elaboración y transmisión de información que se efectúan en el cerebro emplean un código informativo que hasta el momento nos es desconocido; pero la desconocida escritura cerebral se manifiesta, por ejemplo, en la palabra hablada y escrita y en el comportamiento general (el lenguaje y la escritura son expresiones codificadas de la actividad del cerebro): los procesos fisiológicos, psíquicos y lingüísticos, que son portadores de contenido informativo, se manifiestan en ciertas formas físicas, por ejemplo, en el registro encefalográfico de las ondas cerebrales o en las ondas acústicas de la palabra hablada.

WIENER ha señalado la posibilidad de llevar a cabo un análisis armónico de las ondas cerebrales. En un análisis de esta índole de la escritura cerebral podrían aplicarse la idea de SEMON de una teoría de la actividad del cerebro basada en la vibración y la resonancia y la teoría de UCHTOMSKI de los focos cerebrales dominantes y de los campos de energía de excitación: el registro de la información en la escritura cerebral crea campos cerebrales en los que se transforman en símbolos ciertos fenómenos temporales, análogamente a lo que sucede en las representaciones gráficas del lenguaje visible o en las imágenes del sonido de Chladni; cada campo cerebral está vinculado a cierta energía de excitación y a un contenido informativo determinado, que se manifiesta en un espectro semántico específico; y estos espectros pueden reunirse y mezclarse de maneras diversas.

Puede suponerse, de un modo enteramente lógico, que los procesos cerebrales se encuentran vinculados a fenómenos de resonancia y vibración, rítmicos y ondulatorios, y que cabe aplicar aquí los principios de la composición y propagación de ondas, así como otros principios de la teoría de la acción ondulatoria.

En la actividad cerebral, ciertos microprocesos se truecan en macroprocesos de naturaleza fisiológica y psíquica y en conductismo.

Las vibraciones cerebrales no pueden llevarse a otra parte directamente, pero es posible transferirlas en una forma simplificada al encefalograma o transformarlas en la palabra hablada: mediante el lenguaje, la formación y enseñanza y la actividad ideológica puede transmitirse información acerca de los principales conceptos científicos y morales reconocidos socialmente y formar campos cerebrales en los individuos. Aún sabemos poquísimo sobre la escritura cerebral, ya que tanto el encefalograma como el análisis armónico de los sonidos del habla nos informan insuficientemente de la información semántica de los conceptos y enunciados. Mas si suponemos que

la información cerebral se halla vinculada a la acción ondulatoria, podemos usar otro método: aplicar directamente el análisis armónico al lado del sujeto en el lenguaje, esto es, enlazando ciertas ondas con ciertos conceptos y enunciados. Pues es posible expresar mediante una serie de Fourier la información semántica de los conceptos y enunciados que quepa comprehender en una modulación de cierta onda portadora; y de este modo llegamos a unos modelos artificiales matemáticos de la escritura cerebral y preparamos la conexión de la fisiología del cerebro con la matemática y la lingüística.

La psicología informatoria y la telecomunicación

Por HELMER FRANK

INDICE

1. Concepto de la psicología informatoria ... 115
2. Puntos de contacto de la psicología informatoria con la telecomunicación. 117
2.1. Modelos ... 117
2.2. Tareas prácticas ... 118
2.3. Interpretación filosófica ... 118
3. Ejemplos concretos ... 119
3.1. Modelos de la psicología informatoria ... 119
3.1.1. Modelos conceptuales, 119.—3.1.2. Modelos gráficos, 122.—3.1.3. Modelos técnicos, 123.—3.1.4. Valor de los modelos, 125.
3.2. Tareas prácticas ... 127
3.3. Un punto de contacto filosófico entre la psicología informatoria y la telecomunicación ... 133
Referencias bibliográficas ... 134

1. CONCEPTO DE LA PSICOLOGIA INFORMATORIA

Prácticamente, ni la categoría de la materia ni la de la energía (física) han tenido nunca importancia para la psicología, ni siquiera para la psicología experimental, orientada hacia las ciencias de la naturaleza. Podría verse en tal circunstancia un argumento para contar la psicología entre las llamadas "ciencias del espíritu"; pero, entre tanto, la cibernética ha puesto en tela de juicio la contraposición entre ciencias de la naturaleza y ciencias del espíritu; pues, por un lado, una característica de la cibernética es la de estudiar relaciones *no* materiales ni energéticas, sino informativas (cosa que hasta el momento constituía una pretensión *científico-espiritual*), en tanto que, por otro, su procedencia y su esfera por ahora principal de trabajo han de buscarse en los problemas de tipo técnico y biológico (esto, no en las ciencias del espíritu). El hecho de que los conceptos y las cuestiones cibernéticas se estén introduciendo ya incluso en ramas de la investigación que tradicionalmente eran científico-espirituales, por ejemplo, en los dominios de la estética (MOLES, 1958; BENSE, 1956/60; FRANK, 1959a *y* b; GOUBEAU, 1960, y otros), es otra prueba más

de que actualmente se ha de salvar mediante la cibernética la sima —hasta hoy sentida con gran fuerza, al menos en Alemania— entre las ciencias de la naturaleza y las del espíritu; y ello significa para la psicología una ocasión de reflexionar de nuevo sobre su puesto en el sistema de las ciencias.

En especial, la psicología puede intentar valerse cuanto sea posible de la terminología creada por la cibernética, es decir, intentar describir los fenómenos psíquicos con los conceptos de información, codificación, canal, realimentación o retroacción, regimiento [*Regelung*], etc.; ahora bien, se trata de una posibilidad, no de ninguna necesidad; y si llamamos "psicología informatoria" a una dirección investigadora que se valga de semejante posibilidad, tiene que concederse, pues, desde el principio, que son también posibles y están justificadas las descripciones e interpretaciones de los mismos hechos psicológicos que se encaminen en otras direcciones psicológicas. (Del mismo modo, en matemáticas puede representarse y fundamentarse uno y el mismo hecho, ya en forma geométrica *pura,* ya analítico-geométricamente, sin que por ello una de las dos fundamentaciones sea "errónea"; ni tampoco en física es "errónea" la teoría de la elasticidad, aun cuando no existen cuerpos elásticos en sentido riguroso, sino amplias zonas en las que la descripción elastomecánica es particularmente sencilla y suficientemente aproximada para las predicciones.) Es evidente que la aplicación a la psicología de conceptos cibernéticos sólo tiene sentido si de este modo se hace posible una descripción más sencilla de los fenómenos observados o una reducción más sencilla de un fenómeno a otro; mas gran número de resultados individuales —de los cuales sólo mencionaremos aquí unos pocos —justifican que éste es realmente el caso y que, por lo tanto, la psicología informatoria tiene una razón de ser. (Pueden verse otras pruebas en las exposiciones de conjunto de ATTNEAVE, 1959; LUCE, 1960; ROHRACHER, 1961, y FRANK, 1962b).

La psicología informatoria desdeña ciertas cosas, como probablemente hace toda disciplina teorética (la mecánica elástica, por ejemplo, pasa por alto que la ley de Hooke tiene unos límites); y gracias a ello se forma un *modelo* de los acontecimientos psíquicos. (Un modelo es una imagen homeomorfa de un objeto, entendiendo por *homeomorfo* que la reproducción no es multívoca, pero que tampoco se incluyen en el modelo todas las discriminaciones que podrían hacerse, y en este sentido se puede considerar el sistema de los números racionales como modelo del sistema de las fracciones, con lo cual no se recoge la diferencia entre las fracciones propias y las impropias.) Cuando el acervo conceptual del modelo informatorio-psicológico se limita a los términos cibernéticos que se emplean en la telecomunicación, nos encontramos con la posibilidad de *representar gráficamente* las teorías correspondientes por diagramas de bloques o dia-

gramas de flujo, así como con la de *realizarlas* mediante modelos de la telecomunicación; y aquí residen los puntos de contacto básico con esta técnica (FRANK, 1961b).

2. PUNTOS DE CONTACTO DE LA PSICOLOGIA INFORMATORIA CON LA TELECOMUNICACION

Los puntos de contacto entre estas dos disciplinas se nos ofrecen desde tres puntos de vista: 1) en la construcción de modelos; 2) en las tareas prácticas, y 3) cuando se efectúa una interpretación filosófica.

2.1. Los modelos —en el sentido de imágenes simplificadas del objeto original de la investigación— pueden ser (cf. FRANK, 1962a):

2.1.1. modelos conceptuales: palabras;

2.1.2. modelos gráficos: planos, diagramas, el modelo de Félix Klein de la geometría no euclídea, etc., y

2.1.3. modelos corporalmente perceptibles (técnicos): los modelos de aeronaves en los túneles aerodinámicos, los de los reflejos condicionados, etc.

Acaso asombre que contemos entre los modelos las palabras; pero ya SCHOPENHAUER (1847) lo vio con toda claridad:

"Puesto que, como hemos dicho, las representaciones sublimadas a conceptos abstractos —y así destruidas— han perdido toda evidencia, se le escaparían a la conciencia, sin que pudiera ésta sujetarlas para las operaciones mentales que intenta, si no quedasen fijadas y sujetas mediante unos signos arbitrarios, que son las palabras" (§ 26).

"Justamente porque los conceptos encierran en sí menos que las representaciones de las que son abstraídos, son más fáciles de manejar que ellas, y se encuentran a su respecto poco más o menos como las fórmulas de la aritmética superior a las operaciones mentales de las que han surgido y a las que sustituyen... De las muchas representaciones de que han sido extraídas contienen justamente la parte que es precisa; frente a lo que ocurriría si uno quisiera hacerse presentes, mediante la fantasía, aquellas representaciones mismas (pues a la vez se deslizaría un montón de cosas inesenciales y lo desorientaría), ahora, al usar los conceptos, se piensa sólo, de todas aquellas representaciones, en las partes y relaciones que requiera la finalidad del caso. Su empleo ha de compararse, por lo tanto, ... a un deshacerse de bagaje inútil" (§ 27).

Lo que SCHOPENHAUER dice aquí acerca de los conceptos, o, hablando con rigor (véase la cita del § 26), acerca de las *palabras,* no es sino una clara exposición de la función heurística de *todo* modelo; y su pensa-

miento alcanza así un punto clave del modo de pensar cibernético (FRANK, 1962c).

2.2. *Las tareas prácticas* de la psicología informatoria pueden ser:

2.2.1. la determinación empírica —o, siempre que sea posible, deductiva— de valores numéricos que caractericen la capacidad humana de tramitación de datos comunicados [*Nachrichten*] y puedan servir para el planeamiento de los procesos de trabajo en los que tomen parte el hombre *y* la máquina, y

2.2.2. el estudio del comportamiento del individuo humano, así como el del grupo, dirigido a la finalidad inmediata de simularlo por medio de computadoras automáticas digitales o analógicas (HOVLAND y HASELOFF, entre otros), y a la lejana de permitir el reemplazamiento del hombre por autómatas. (En NEWELL y SIMON, 1961, se presenta un ejemplo concreto perteneciente a la esfera de la "resolución de problemas".)

Como es natural, hace ya tiempo que se han atacado estos problemas con ocasión de diversas investigaciones sobre telecomunicación, sin que por ello se hablase de "psicología informatoria"; pues, en general, la cibernética no se ocupa *ante todo* de descubrir nuevos dominios de investigación, sino que por lo pronto coordina las investigaciones ya en marcha valiéndose de formaciones conceptuales unitarias y de puntos de vista supraordinados (WIENER, 1948, pág. 23). Sin embargo, tal vez no sea superfluo señalar que los intereses psicológicos del técnico de la telecomunicación no pueden satisfacerse mediante una orientación psicológica *cualquiera, arbitraria:* por ejemplo, apenas le es útil la "psicología comprensiva", orientada hacia las ciencias del espíritu, y que en el extranjero se considera "como un fenómeno típicamente alemán" (HOFSTAETTER, 1957, página 315), ya que el técnico aludido necesita principalmente formulaciones cuantitativas.

2.3. *Una interpretación filosófica* del "mensaje *o* dato que se comunica" es algo siempre subyacente, de forma más o menos explícita, a toda exposición de los sistemas técnicos que no sólo tramitan tales datos, sino que los transmiten, así como a muchas justificaciones de la introducción de una cantidad de información. Al parecer, para ello es ineludible una matemática de la consciencia, aunque sea sólo como idea modélica (GÜNTHER, 1957; STEINBUCH, 1962; FRANK, 1962a); ahora bien, la consciencia constituye un tema de toda psicología que no sea radicalmente conductista (ROHRACHER, 1960, página, 65; HOFSTAETTER, 1957, págs., 62 s.).

En la sección 3 vamos a documentar estos puntos de contacto mediante una serie de ejemplos.

3. EJEMPLOS CONCRETOS

3.1. Modelos de la psicología informatoria

3.1.1. Modelos conceptuales

Hay diversas expresiones técnicas de la telecomunicación que son muy apropiadas para describir comprimidamente fenómenos psicológicos, aunque, como es natural, pasen por alto ciertas cosas; y como ejemplos pueden servirnos los conceptos de *canal, información* y *codificación.*

Se entiende por *canal* —en un sentido generalizado: cf. FRANK, 1961a— un dispositivo para transmitir un mensaje o dato comunicable de un punto del espacio-tiempo tetradimensional a otro, y en el que tal dato pueda sufrir modificaciones sistemáticas o fortuitas. Tenemos, en particular, un "canal espacial" cuando el lapso temporal entre la entrada y la salida carece de importancia (por ejemplo, en el teléfono), un "canal temporal" cuando es el transporte espacial lo que puede desdeñarse (así en el monumento conmemorativo) y un "canal espaciotemporal" en todos los demás casos (como en el periódico). Si llamamos *percepción* a la primera fase del percatarse de algo, en la que los estímulos exteriores, penetrando por los órganos de los sentidos, se transmiten a los centros nerviosos, son allí tramitados y, finalmente, se ofrecen —en la "apercepción"— a la fluctuante atención (STEINBUCH y FRANK, 1961), el proceso de la percepción tiene lugar entonces en un canal espacial, que probablemente debe considerarse que abarca desde los órganos de los sentidos hasta los centros de proyección sensorial. Mayor importancia psicológica tienen dos "canales temporales" del hombre: el almacén reciente y la memoria preconsciente. Con la expresión *almacén reciente* queremos designar la instancia mediante la cual se conservan conscientes durante unos diez segundos ("duración del presente"), y sin perjuicio de su sucesión temporal, los contenidos de consciencia sucesivamente presentes; en cuanto a la *memoria preconsciente,* por el contrario, designa aquel canal cuyo contenido, aunque no nos es consciente ininterrumpidamente, podemos hacer consciente asociativamente valiéndonos de informaciones apropiadas que nos sirvan de llave —esto es, contenido que podemos avocar al almacén reciente—. (No es imprescindible que estos canales temporales sean identificables con unas redes neuronales determinadas; compárese, en cambio, la interpretación de STEINBUCH (1962), muy distinta de ésta. El almacén reciente es, por lo tanto, un modelo conceptual, que vale para simplificar la exposición y acaso sea comparable a la representación en el campo complejo de tensiones o corrientes.)

Utilizando métodos taquistoscópicos se puede determinar la máxima riqueza de los datos justo susceptibles de percepción (o de los que justamente se tenga conciencia) cuando se los comunica o presenta durante

un tiempo muy corto perfectamente definido; y la viabilidad de este experimento acredita la existencia del almacén reciente, que mantiene algunos segundos las diversas partes del dato, de modo que no desaparezcan de la consciencia del sujeto antes de que ésta pueda reproducirlas.

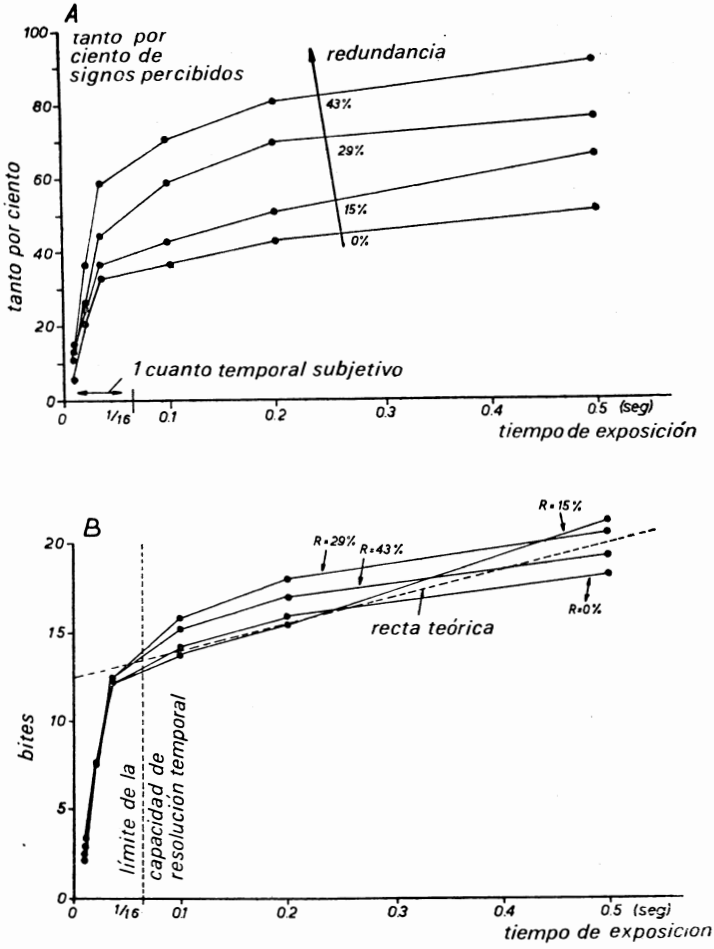


Fig. 1. Los resultados obtenidos por MILLER, BRUNER y POSTMAN, presentados en coordenadas lineales. Pueden verse, correspondientes a las mismas series de ensayos, el tanto por ciento de signos percibidos (en A) y la cantidad de información recibida (en B). La extrapolación de la recta más allá de 1/16 de segundo indica que en fenómenos de formación de secuelas se captan, por lo menos, 12 bitios; la capacidad máxima (a la que se produce la congestión) es de unos 16 bitios/segundo.

En la figura 1 puede verse que la relación entre la información apercibida y el tiempo taquistoscópico de exposición es lineal, por lo menos para tiempos de exposición mayores que 1/16 de segundo —unidad tem-

poral psicológica usual desde hace un siglo con los nombres de "cuanto temporal subjetivo" (CTS) o "momento"—. (La gran pendiente de la curva para tiempos extremadamente cortos indica que el tiempo de apercepción es algo mayor que el de exposición y, por lo tanto, que también en ciertas instancias subordinadas se encuentran canales temporales.) Estos ensayos (MILLER *et al.*, 1954) han señalado, además, que el dato apercibible en un intervalo temporal determinado puede ser tanto más rico (medido en número de signos apercibidos) cuanto más redundante sea (fig. 1 A), pero que puede decirse, con buena aproximación, que, *independientemente de la redundancia,* en un lapso temporal dado cabe apercibir un *volumen de información* determinado (fig. 1 B). Así pues, el concepto de información, que procede de la telecomunicación, es apropiado en psicología como medida de la riqueza de un dato comunicado o mensaje. Por otra parte, en la figura 1 B se puede obtener la pendiente de la curva, que corresponde a una capacidad máxima —a la que se produce la congestión— en el almacén reciente de unos 16 bitios/seg, o sea, de 1 bitio/CTS (FRANK, 1959a, § 3.6), valor numérico cuyo orden de magnitud está de acuerdo con los resultados de otros experimentos; y análogamente puede calcularse, a partir de diversos experimentos concordantes entre sí, que la memoria preconsciente tiene una capacidad máxima (o de congestión) de 0,7 bitios/segundo aproximadamente (VON CUBE, 1960; FRANK, 1962b).

En experimentos como los de MERKEL (1885) y HYMAN (1953), por ejemplo, se pide al sujeto que efectúe una codificación. Así, HYMAN hace coordinar, empleando un código convenido, unas luces que se encienden y se apagan con unas sílabas carentes de significación previamente aprendidas; el tiempo de reacción promedio de las pruebas resulta ser función lineal de la información media de las señales luminosas durante los ensa-

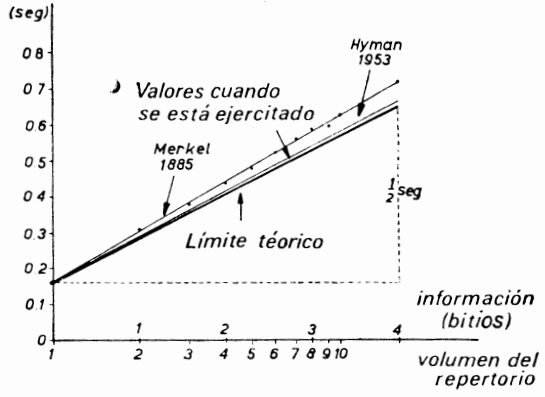


Fig. 2. Información semántica y tiempo de reacción. Diagrama simplificado de los resultados obtenidos por MERKEL y de los mejores (o sea, con menor tiempo de reacción) de HYMAN. Con el ejercicio puede disminuir la pendiente de la recta resultante hasta alcanzar cierto límite teórico.

yos (fig. 2), y la pendiente de la recta corresponde con gran exactitud a una velocidad de apercepción de sólo 8 bitios/seg. En este caso, los sujetos han de tener presentes, además de las señales luminosas, unas sílabas apropiadas que tengan igual contenido informativo; y a la información "sintáctica" percibida en aquellas señales —a saber, 8 bitios/seg— se añade, pues, mediante la codificación, una cantidad igual de "información semántica" memorizada, con lo que llegamos de nuevo a 16 bitios/seg (FRANK, 1962b, págs. 124 s.).

3.1.2. Modelos gráficos

La terminología inspirada en la telecomunicación, de la que hemos indicado algunas cosas en el apartado 3.1.1., lleva naturalmente a unas representaciones gráficas que se corresponden con los diagramas de blo-

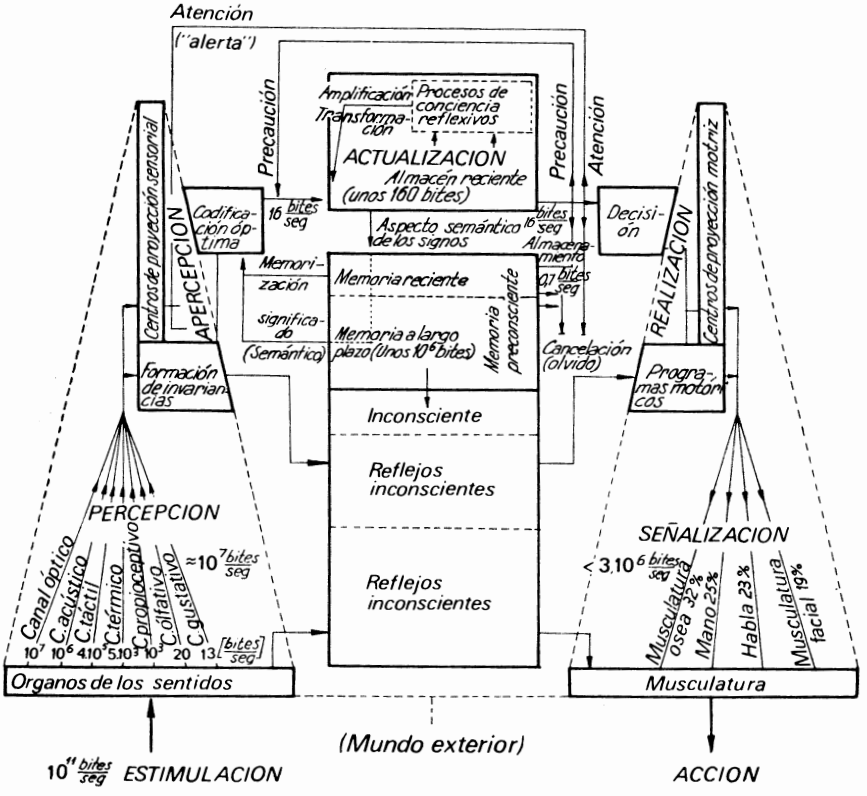


Fig. 3. Organigrama del flujo de información en el hombre.

ques y los de flujo de los técnicos de la telecomunicación y de los programadores de las computadoras automáticas. En la figura 3 (de FRANK, 1961a y 1962b) puede verse el esquema de un organigrama simplificado

del flujo de información en el hombre, si bien es preciso dejar en tela de juicio la palabra "organigrama", puesto que aquí enlazamos entre sí *centros tramitadores* (así, órganos sensoriales y centros de proyección), según se hace en los diagramas de bloques, al mismo tiempo que representamos de un modo sencillo la *sucesión de los procesos,* al modo de los diagramas de flujo. STEINBUCH (1961b, pág. 188) presenta un gráfico más sencillo —y más semejante al diagrama de bloques— del flujo de información en el hombre, y refiere a él (1962) una tipificación de las funciones psíquicas.

3.1.3. Modelos técnicos

El paso mental de los modelos gráficos a los técnicos es inmediato, pese a lo dificultoso que es tecnológicamente en la mayoría de los casos. Piénsese, como primera y tosca aproximación, en la representación del almacén reciente mediante un registro deslizante de 160 pisos, en el que el contenido de cada una de las 160 células individuales (cada una de 1 bitio) avanzase una posición en cada cuanto temporal subjetivo: en semejante modelo técnico quedarían representados, en primer lugar, la ordenación temporal de los contenidos de consciencia; en segundo, su permanencia en la conciencia durante la duración del presente (unos diez segundos), y, en tercer término, la velocidad de apercepción, de unos 16 bitios/seg. Mas cuando se estudia este modelo desde el punto de vista de la teoría de la codificación se advierte que en él se ha perdido la capacidad de decidir, ya que falta el elemento inicial de la cadena binaria con la que habría que representar en el registro el contenido de conciencia que fuese. Así pues, sería preciso ampliarlo: por ejemplo, con otro registro deslizante conectado en paralelo que sirviese para especificar los comienzos de las cadenas binarias de signos individuales.

Todo modelo técnico de la memoria preconsciente debe tener en cuenta, ante todo, que actualizamos los contenidos de la memoria mediante asociaciones, y no, por ejemplo, enviando peticiones dirigidas a lugares determinados del almacén para que nos comunicasen el contenido allí existente. La matriz de aprendizaje de STEINBUCH (1916a *y* b) puede valer *como* elemento constructivo de un modelo de la memoria (véase también la comunicación de P. MÜLLER [en esta misma obra]).

Cabe considerar que el funcionamiento de una matriz de aprendizaje es una realización del proceso de formación de un sistema de reflejos condicionados; y en la figura 4 pueden verse sus características de principio, dejando de lado las particularidades técnicas. Podemos caracterizar el estímulo olfativo del conocido experimento pavloviano mediante una serie de "rasgos *o* notas de olfación", p_1, p_2, etc., que puedan tanto estar presentes como ausentes; si, por ejemplo, p_1 está ausente, mientras que p_2 y p_3 se hallan presentes, en la matriz ${}_pA_s$ de la figura 4 quedan activadas la entrada inferior de p_1 y las superiores respectivas de p_2 y p_3; esta com-

binación de estímulos se coordina por la salida s_2 (que, por lo general, posee conexiones —marcadas con triángulos— con las entradas activadas), a través de la matriz ${}_sR_p$, con un sistema de señales binarias de salida (que cabe interpretar, por ejemplo, como excitaciones e inhibiciones de unas

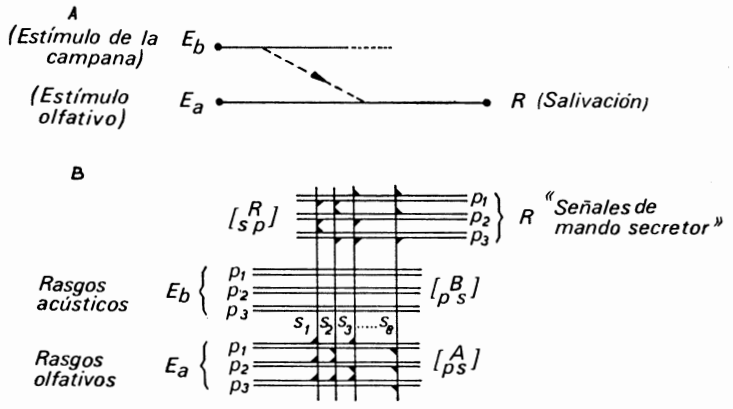


Fig. 4. A) Representación simbólica de la formación de un reflejo condicionado (ejemplo, el experimento pavloviano con perros).

B) Disposición correspondiente de matrices de aprendizaje de STEINBUCH (en el conjunto dibujado pueden llegar a formarse hasta ocho reflejos condicionados).

neuronas eferentes); en el caso que hemos puesto, las salidas p_1 y p_3 de ${}_sR_p$ están marcadas negativamente, y la p_2 positivamente. El "dipolo" ${}_pA_{ss}R_p$ es un coordinador invariable, que codifica un sistema de estímulos incondicionados, E_a, en un sistema de reacciones incondicionadas, R; pero si se excitan simultáneamente ${}_pA_s$ (mediante rasgos "olfativos") y ${}_pB_s$ (mediante rasgos "acústicos"), se forman automáticamente en ${}_pB_s$ unas conexiones correspondientes con la conducción de tipo s que desencadene la reacción incondicionada, de suerte que más tarde ésta se produce, como reacción condicionada, por virtud del estímulo acústico.

Es muy natural describir la memoria preconsciente valiéndose del modelo conceptual del reflejo condicionado, de modo que los sistemas de matrices de aprendizaje se nos ofrecen por sí mismos como modelos técnicos. Señalemos en este punto brevemente que BOK (1961) ha formulado acerca de la memoria una hipótesis basada en observaciones del sistema nervioso central, y ha estudiado sus analogías y diferencias con respecto a la matriz de aprendizaje de STEINBUCH.

Las investigaciones que fundamentan la pertinencia psicológica de la cantidad de información llevan a suponer la existencia, antes del almacén reciente, de otra instancia que entregue a aquél de tal modo los estímulos del mundo exterior —por ejemplo, unas letras conocidas— que el tiempo de entrega exigido sea aproximadamente proporcional a la información del

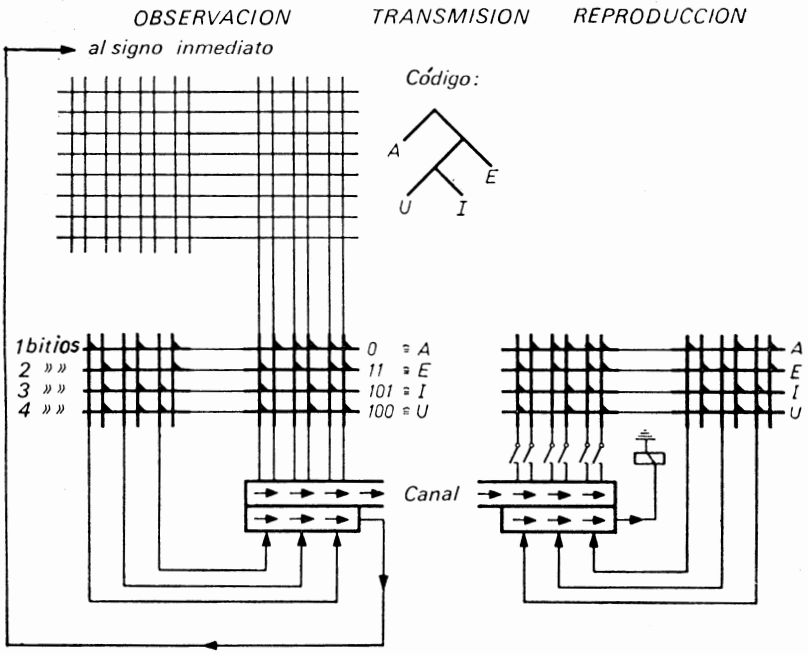


Fig. 5. Codificación y descodificación binarias mediante matrices de aprendizaje y un registro deslizante. La reproducción —por ejemplo, impresión— de los cuatro signos requiere unos tiempos que son proporcionales a la información de aquéllos (cf. el árbol codificador). Por lo demás, cabe simplificar este modelo.

estímulo; cosa que cabe imaginar realizada, ante todo, mediante una codificación binaria más o menos óptima del objeto percibido. En la figura 5 se señala una manera posible de representar un tiempo de reacción proporcional a la información mediante un sistema de matrices de aprendizaje y registros deslizantes (FRANK, 1961b).

3.1.4. Valor de los modelos

Los modelos pueden tener, en general, un valor didáctico, heurístico, técnico o filosófico. El valor didáctico de los modelos gráficos y técnicos reside en que lo visible —o, al menos, imaginable— se nos queda mejor que las relaciones abstractas. El valor heurístico de todos los modelos se apoya en la reducción de situaciones fácticas complejas a un conjunto de informaciones no excesivamente grande con respecto a las posibilidades de captación del almacén reciente; y cuando no es posible llegar a semejante reducción, pero se formulan axiomáticamente todos los hechos fundamentales, los modelos técnicos pueden proporcionar, como simuladores, los resultados que se buscaban y que fuesen difíciles de calcular. En el apartado 3.2 hablaremos del valor técnico.

Puede considerarse, con MOLES (1958, pág. 202), que el valor filosófico de los modelos tomados de la telecomunicación consiste en que demuestran la realizabilidad física de funciones psíquicas (por lo menos mientras se miren éstas desde un punto de vista conductista).

Podemos hacer patente con un ejemplo el valor heurístico de los tipos de modelo de la teoría de la información que hemos esbozado. Varios psicólogos experimentales (ATTNEAVE, NOBLE, ARNOULT) hacen que los

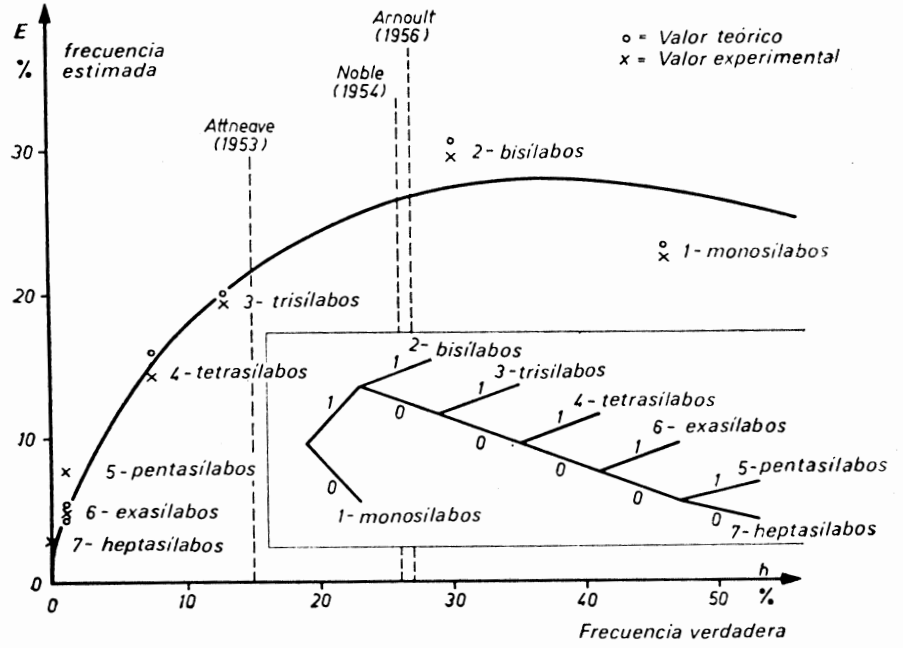


Fig. 6. La frecuencia estimada como función de la frecuencia verdadera. En este caso —indicado con cruces y un árbol codificador óptimo— había que estimar la frecuencia de palabras de una sílaba, de dos, etc., de un texto alemán (de Musil) leído escandiendo las sílabas.

sujetos evalúen numéricamente la frecuencia relativa de una serie de signos (por ejemplo, letras) o que los ordenen en una escala dada de frecuencias: el valor estimado, E_i, resulta no ser proporcional a la frecuencia verdadera, F_i, de los signos S_i, sino que se encuentra una clara tendencia a *sobre*valorar la frecuencia de los signos poco comunes y a *infra*valorar la de los más frecuentes. La interpretación natural de esta situación con nuestro modelo es la que sigue.

Un signo, S_i, se destaca tanto más dentro de una sucesión apercibida de signos cuanto más tiempo se emplee en conjunto en apercibirlo a lo largo de todas las veces que aparezca; tiempo que es proporcional: 1) a

la frecuencia, f_i, de tal signo, y 2) a su información, I_i; con lo que su destaque, d_i, será

$$d_i = \text{C}^{\text{te}} \; f_i \cdot I_i = \text{C}^{\text{te}}. \; f_i \cdot \log 1/f_i.$$

(Podemos calcular la constante teniendo en cuenta la condición de que la suma de todos los destaques tiene que valer el 100 %.) De hecho, la función de destaque corresponde bastante bien hasta $f_i = 37$ %, poco más o menos, a las curvas de estimación halladas empíricamente, de modo que puede admitirse que el hombre, en sus estimaciones, da los valores del destaque (salvo que se haya ejercitado en la estimación de las frecuencias); pero ello quiere decir que sus apreciaciones son falsas incluso cualitativamente por encima del 37 %: el signo más frecuente parecerá ser menos corriente que el inmediatamente siguiente en frecuencia. En los experimentos mencionados no se encontraba una frecuencia tan elevada (figura 6); los propios ensayos del autor confirman, sin embargo, este "efecto de máximo" (cruces de la fig. 6), que, por lo demás, disminuye al aumentar el ejercicio y la edad, e incluso la inteligencia, y que desaparece enteramente cuando se adoptan determinadas disposiciones experimentales.

Cuando se parte del tosco modelo del almacén reciente que hemos propuesto, apoyado en los métodos de la telecomunicación (esto es, un registro deslizante dotado de un dispositivo codificador óptimo previo), habría que sustituir en la fórmula anterior el valor de información en que calculábamos I_i, o sea, log $1/f_i$, por el del número de bitios necesarios para la codificación óptima (compárese el árbol codificador de la fig. 6); de este modo se obtiene, como predicción teorética de los valores estimados, la serie de puntos señalados con un círculo en la figura 6 (en vez de la curva), y, por tanto, un efecto de máximo más marcado, que, además, concuerda mejor con los resultados empíricos. (En FRANK, 1962, págs. 104 ss., se describe más pormenorizadamente este efecto, juntamente con su dependencia de la inteligencia, la edad y el ejercicio.) Tenemos, con ello, uno de los pocos indicios existentes de que en alguna parte del sistema nervioso central podría tener lugar una codificación digital binaria (SCHWARTZKOPFF, 1962, presenta otros indicios, éstos de orden fisiológico); pero para nosotros este efecto interesa sólo como ejemplo de que los modelos valederos no solamente sirven para interpretar de modo visible, intuitivo, unos hechos hallados empíricamente (en nuestro caso, los resultados de ATTNEAVE, NOBLE y ARNOULT), sino que pueden llevar a consecuencias inesperadas; y, en caso de que éstas se confirmen mediante experimentos (que de otro modo no se hubiesen realizado, adviértase bien), como en nuestro ejemplo, el modelo correspondiente acreditará su valía heurística.

3.2. Tareas prácticas

La tarea técnica que se ofrece a la cibernética es la de descargar al ser humano de los trabajos mentales que abandonaría de buena gana;

para ello es a menudo necesario (si bien no siempre) saber cómo efectúa el hombre mismo los procesos de tramitación de datos que habrían de automatizarse. En cuanto a que *no siempre* sea menester un conocimiento del modo de comportamiento del hombre [al respecto], se debe a que a veces una sola y única tarea puede resolverse de varias maneras, y a que la solución *óptima* depende de los materiales e instrumentos que se empleen: así, por ejemplo, puesto que la matriz steinbuchiana de aprendizaje ha de cumplir unas tareas técnicas, *de éstas* —y no de la máxima fidelidad en la simulación del condicionamiento clásico— penden los criterios de su realización óptima, que, debido al empleo de elementos constructivos inorgánicos, no tiene por qué encaminarse a semejante fidelidad (cf. BOK, 1961); y, por proponer otro ejemplo: el que una persona use un procedimiento riguroso para extraer una raíz cuadrada no está en contradicción con el hecho de que el procedimiento iterativo sea más apropiado para las computadoras automáticas actuales, gobernadas mediante programas.

A pesar de estos contraejemplos, los casos en los que el conocimiento del modo de tramitar la información propio del hombre tiene mucha importancia para la técnica cibernética no constituyen, en modo alguno, una excepción. Tal sucede con las máquinas de lectura de signos, a las que tiene que exigírseles la formación de invariantes: estas máquinas, por ejemplo, tienen que reconocer en

M M M

el mismo signo, del cual han de separar netamente, en cambio, tanto

≶

como

W

Pues en la percepción humana las formaciones invariantes frente a traslaciones y transformaciones homotéticas y afines, así como frente a torsiones, desempeñan un papel muy considerable, en tanto que las que lo son frente a rotaciones lo hacen en menor medida, como hace ver el ejemplo.

Ahora bien, las matrices de aprendizaje no digitales de Steinbuch permiten la formación de invariancias frente a transformaciones afines, traslaciones y torsiones, en tanto que reconocen las rotaciones (STEINBUCH y FRANK, 1961). En la conferencia de P. MÜLLER * se trata de la realización técnica de este modelo; nosotros nos vamos a limitar aquí a un examen teorético de este dispositivo.

---

* Véase, en este volumen, P. MÜLLER, «Clases y propiedades de las matrices de aprendizaje» (p. 137).

Lo mismo que ocurría en la matriz de aprendizaje binaria, que ya hemos mencionado en el apartado 3.1.3, en la no digital el objeto a reconocer (por ejemplo, un trítono) se capta mediante ciertos rasgos (así, tonos); pero, frente a lo que sucedía con la matriz binaria, no ocurre que éstas existan o falten simplemente, sino que pueden estar presentes con "intensidades" distintas (en el ejemplo puesto, las frecuencias de las tres notas).

En el caso de un trítono se encuentra un número finito de rasgos, a saber, tres; cuando se trata de una letra (por ejemplo, la W), puede considerarse el signo como gráfica de una función y muestrear ésta —la llamada "función de rasgos"— en un número finito de puntos, como se ve en la figura 7 A (en el caso de la letra W bastarían, procediendo por inter-

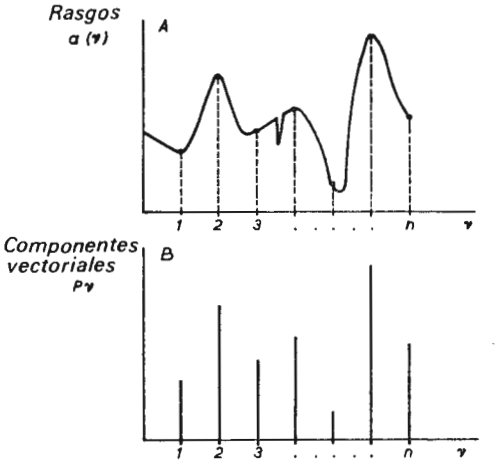


Fig. 7. A) Muestreo de una función de rasgos en n puntos.
B) Intensidad de n rasgos (por ejemplo, evaluados en una función de rasgos), que pueden ser interpretados como las componentes de un vector n-dimensional.

polación lineal, 5 puntos). De todos modos, se llega siempre a un sistema finito de números reales, p, bien sea como resultado de una toma de muestras (fig. 7 B) o porque se nos hayan dado de antemano (como las tres frecuencias de un trítono), y cabe considerar los números p como componentes de un vector, $\vec{p}$ (así como representarlos gráficamente en el caso tridimensional). En la representación vectorial, una multiplicación de todas las componentes de este vector por el mismo número, que corresponde a una transformación afín de la función de rasgos (o, en el otro ejemplo, a una transposición del trítono a otra tonalidad), significa simplemente una variación de magnitud del vector, conservándose constante su dirección. En particular, supongamos que unos vectores de comparación, $\vec{g}_1$, $\vec{g}_2$,

$\vec{g}_3$ y $\vec{g}_4$, tienen todos la longitud unidad (fig. 8): pueden ser representantes normalizados de ciertos objetos normales (por ejemplo, cuatro trítonos elegidos en el continuo de todos los acordes posibles). Si se altera un poco un objeto de esta índole —como ocurriría, por ejemplo, variando algo la relación entre las frecuencias—, se produce en la representación vectorial de la figura 8 un pequeño cambio de dirección del vector (y, secundariamente, acaso también una variación de la intensidad); mientras la alteración —en la imagen vectorial, el cambio de dirección— no sea muy grande, el ser humano sigue reconociendo el objeto, pero cuando se trata de

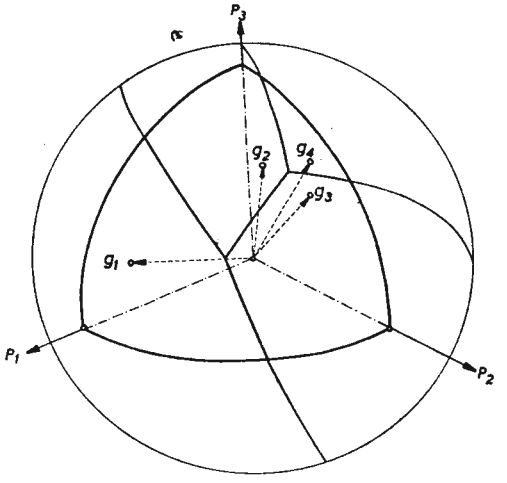


Fig. 8. Representación de cuatro objetos normales —o configuración, por ejemplo, de acordes— mediante cuatro vectores unitarios, $\vec{g}_i$, de un espacio de rasgos tridimensional. En el caso de un trítono, por ejemplo, las tres componentes vectoriales pueden representar las frecuencias de las tres notas del trítono.

una alteración importante puede reconocer en él, equivocadamente, otro objeto normal (o configuración [*Muster*]). Este comportamiento [discriminatorio] puede reflejarse en el modelo merced a la formación del producto interno * del vector $\vec{p}$, que corresponda a un objeto observado (un trítono real), con los representantes, $\vec{g}_i$, de la configuración: bastará atribuir $\vec{p}$, como desviación debida a alteraciones, a aquel $\vec{g}_i$ con el cual se tenga mayor producto interno (con el cual forme, por lo tanto, un ángulo menor).

* Dicho sucintamente, se llama *producto interno* (o *producto escalar*) de dos vectores a la cantidad (escalar) que se obtiene multiplicando los módulos (magnitudes) de los vectores entre sí y por el coseno del ángulo que formen. (*N. del T.*)

De este modo, las configuraciones de la figura 8 dividen el espacio en cuatro sectores, y todo objeto que se represente mediante un vector situado en el sector de $\vec{g}_i$ se reconocerá o bien como la configuración representada por $\vec{g}_i$ o como una variante de ella. (El triángulo esférico marcado con trazo grueso señala la región de componentes vectoriales no negativas, que es la única que nos interesa en el ejemplo del trítono.) Es evidente que así se consigue una invariancia del reconocimiento frente a transformaciones afines, y, por tanto, frente a dilataciones o contracciones del vector, ya que de este modo no se puede abandonar el sector que sea (*no* nos vamos a ocupar aquí de formaciones invariantes frente a traslaciones o torsiones).

Este modelo, en realidad, no reproduce por ahora ningún comportamiento humano de importancia, pues si bien "reconoce" *cualquier* objeto arbitrario, por aleatoriamente que se haya formado, como una de las cuatro configuraciones acuñadas, lo aleatoriamente constituido se le aparece al hombre casi siempre como "desorden", ya que sólo admite como "alteraciones" de una configuración lo que se encuentre dentro de una pequeña zona de deformaciones alrededor de ésta. Para reflejar en el modelo este comportamiento se fija un umbral para el ángulo entre $\vec{p}$ y $\vec{g}_i$ (por ejemplo, en la fig. 9, 10°), que no puede excederse si es que $\vec{p}$ se ha de interpretar como variante de $\vec{g}_i$; y todo cuanto caiga fuera de las "islas de orden" de la figura 9 se interpretará como desorden. Cabe mejorar este artilugio en cuanto modelo de los procesos perceptivos si se supone que

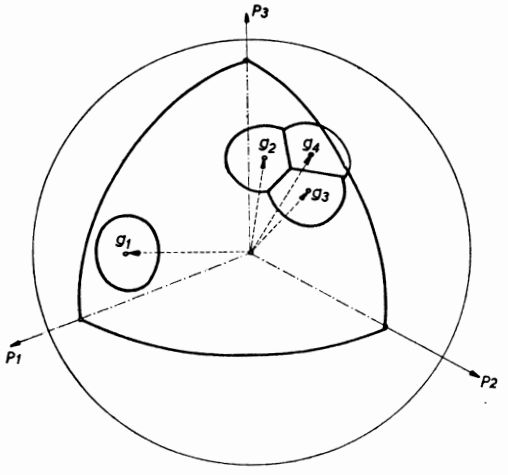


Fig. 9. Zonas admisibles de cuatro formas perceptivas, delimitadas mediante un umbral y la detección de valores extremos.

no es menester que todos los $\vec{g}_i$ tengan desde el comienzo la longitud unidad y permanezcan invariables, sino que crecen a partir de cero durante un proceso de aprendizaje y que en caso de que se los use muy rara vez se acortan de nuevo poco a poco: como entonces el producto interno de los $\vec{g}_i$ por el vector $\vec{p}$ no depende ya exclusivamente del ángulo que formen con éste, sino también de la longitud que tenga cada $\vec{g}_i$, las zonas de deformación toleradas alrededor de estos últimos vectores son —para valor constante del umbral— grandes cuando los $\vec{g}_i$ están muy bien aprendidos o se emplean con frecuencia, y, por el contrario, pequeñas cuando se acaban de aprender o se usan sólo rara vez (antes de formar el producto es preciso normalizar los $\vec{p}$ o hacer el valor del umbral proporcional a $/\vec{p}/$); lo cual corresponde muy bien al comportamiento del ser humano.

Ocasionalmente puede ser oportuno aumentar o disminuir diferenciadamente los umbrales de los distintos $\vec{g}_i$, por ejemplo, cuando en virtud de

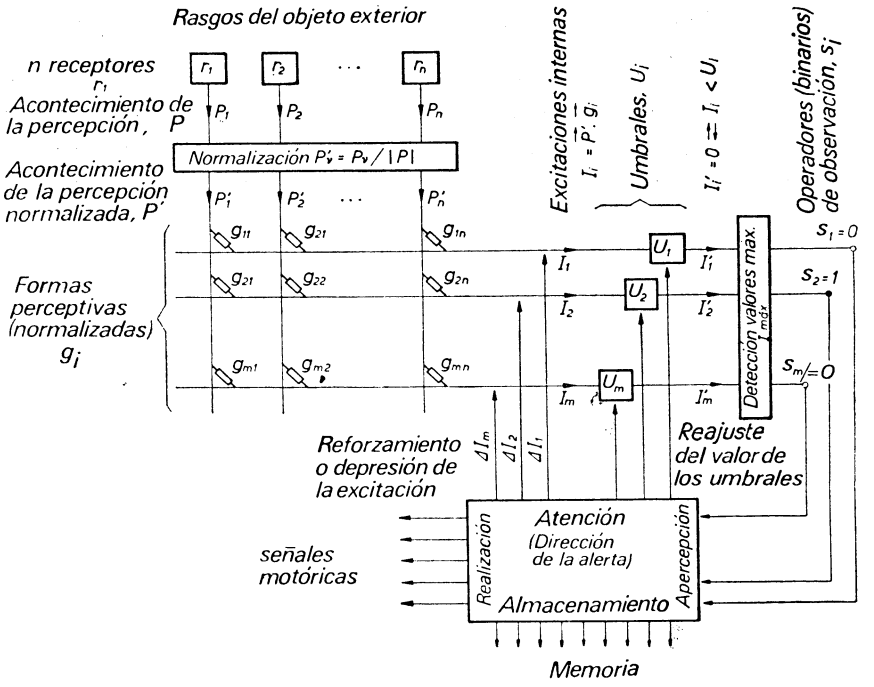


Fig. 10. Perceptor no digital dotado de circuitos de umbral y de máximos, que puede valer de elemento constructivo para un modelo de la percepción con retro-*acción.*

evaluaciones previas de las informaciones disponibles se sepa que este o aquel objeto no entra en cuestión, y, por otro lado, haya que tener en cuenta alteraciones extremadamente grandes. En la figura 10 puede verse un dispositivo que refleja en un modelo técnico semejante comportamiento —en el que atiende ya a cierta combinación de percepción y apercepción—. (Nos ocuparemos de este tipo de posibilidades de ampliación del modelo en uno de los próximos números de los *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft.*) Es innecesario demostrar que semejante dispositivo no solamente puede servir como modelo de una teoría de la percepción, sino, además, cumplir tareas técnicas.

3.3. Un punto de contacto filosófico entre la psicología informatoria y la telecomunicación

En una frase muy citada de WIENER (1948, pág. 155) se dice que la información en la cibernética ha de entenderse como tal información, y no como materia ni como energía. Y, de acuerdo con ello, la técnica cibernética habla menos de vinculaciones causales que de relaciones informativas; por ejemplo, en los circuitos de regimiento se tramita una información sobre un valor real pasándola, por comparación con el valor teórico correspondiente, a elemento de regimiento. Esta manera de considerar las cosas es con frecuencia más cómodo y heurísticamente mucho mejor que un análisis causal, asimismo posible; y, en realidad, la información se apoya muchas veces en una inversión de las conexiones causales, a saber: cuando se concluye de un signo a su causa —cosa, como es sabido, no siempre factible de modo unívoco, pese a la rigurosa validez de la ley de causalidad (FRANK, 1962a)—. Lo cual, verdaderamente, es paralelo a la experiencia interna de que el hombre efectúa siempre tales conclusiones retroactivas apoyándose en unas causas, en tanto que, por el contrario, no cabe la menor duda de que el autómata está *determinado causalmente* (no necesitamos entrar ahora en los discutidos casos particulares en los que se aplica una "fuente de números aleatorios", por ejemplo, gobernada por una sustancia radiactiva); pero, con todo, lo consideraremos, por analogía con la conciencia humana, "como si" evaluase *informaciones.* Por tanto, del campo de la psicología informatoria —o, en general, de toda orientación psicológica que no sea radicalmente conductista— procede un fértil principio heurístico de la técnica cibernética; y en relación con él puede señalarse asimismo otro principio que, casi sin excepción, desempeña un papel en todas las orientaciones de la psicología: el principio teleológico. Los análisis filosóficos han sacado a luz las relaciones que este último posee con los circuitos de regimiento (KLAUS, 1961; FRANK, 1962a); es muy notable que así se vaya preparando la posibilidad de retrotraer el comportamiento dirigido a una meta, por el que se interesa el psicólogo, al principio del regimiento, propio de la técnica de la

telecomunicación; o bien, a la inversa, de interpretar teleológicamente, por analogía con la psicología, los sistemas de regimiento; y de este modo, por lo demás, se hará obvio que la teleología no tiene por qué presuponer fuerzas sobrenaturales algunas.

RESUMEN

Tanto para la psicología como para la telecomunicación, las relaciones informativas tienen mayor importancia que los datos materiales y energéticos; y por ello la psicología informatoria se esfuerza en formular de un modo más preciso que hasta ahora conceptos psicológicos cuantitativos, aplicando los conceptos de la técnica de las telecomunicaciones. Estos *modelos conceptuales* están justificados por la concisión que permiten cuando se exponen muchos resultados experimentales.

Los modelos conceptuales pueden representarse en forma visible mediante *organigramas* (que son análogos a los diagramas de bloques de la telecomunicación). Hemos mostrado, apoyándonos en los ensayos de ATTNEAVE, NOBLE y ARNOULT, cómo pueden contribuir estos modelos gráficos a formular hipótesis susceptibles de indagación.

Asimismo pueden construirse modelos visibles valiéndose de los métodos de la telecomunicación; y los modelos técnicos no solamente son utilizables para fines didácticos y —en casos complicados— para simular los comportamientos humanos cuya formulación matemática presenta dificultades insuperables (incluso cuando se los considera dependientes de la transmisión de datos), sino también para la exoneración del hombre gracias a la automatización de las tareas mentales.

Esta manera de pensar puede hacerse intuitivamente visible mediante las matrices de aprendizaje para los procesos de reconocimiento de configuraciones. Hemos descrito un modelo que goza de invariancia frente a transformaciones homotéticas y afines y frente a torsiones, en tanto que reconoce las rotaciones y las transformaciones de semejanza; y mediante una leve generalización de tal circuito pueden representarse en forma de modelos otros interesantes procesos psicológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ATTNEAVE, F. (1959): *Applications of Information Theory to Psychology (A summary of basic concepts, methods and results).* Nueva York, Henry Holt and Company.

BENSE, M. (1956/60): *Aesthetica, II-IV.* Baden-Baden, AGIS-Verlag.

BOK, S. T. (1961): Beobachtungen zentralnervöser Strukturen im Hinblick auf Gedächtnisfunktionen. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 2,* 97-110.

FRANK, H. (1959a): *Grundlagenprobleme der Informationsästhetik und erste Anwendung auf die Mime Pure.* Stuttgart, disertación en la Escuela Técnica Superior (Librería Hess, Waiblingen).

FRANK, H. (1959b): Théorie informationelle de la réalisation et perception dans l'art du mime. *Cahiers d'Etudes de Radio-Télévision, 24,* 377-387.

FRANK, H. (1961a): Zum Problem des vorbewussten Gedächtnisses. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 2,* 17-24.

FRANK, H. (1961b): Die Lernmatrix als Modell für Informationspsychologie und Semantik. *Lernende Automaten,* ed. de H. Billing. München, R. Oldenbourg (pp. 101-108).

FRANK, H. (1962a): Kausalität und Information als Problemkomplex einer Philosophie der Kybernetik. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 3,* 25-32.

FRANK, H. (1962b): Kybernetische Grundlagen der Pädagogik. (Information et pédagogie). *Eine Einführung in die Informationspsychologie und ihre philosophischen, mathematischen und physiologischen Voraussetzungen.* Baden-Baden, AGIS-Verlag; París, Gauthier-Villars.

FRANK, H. (1962c): Kybernetik — Wesen und Wertung. *Kybernetik und Organisationsmethodik,* ed. de H. Mader. Conferencia del primer simposio de Quickborn, 1962. Quickborn bei Hamburg, Verlag Schnelle (en prensa).

GOUBEAU, I. (1960): Ein informationsästhetischer Ansatz zur Deutung der griechischen Musikgeschichte. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 1,* 129-136.

GÜNTHER, G. (1957): *Das Bewusstsein der Maschinen. Eine Metaphysik der Kybernetik.* Krefeld, AGIS-Verlag.

HOFSTÄTTER, P. R. (1957): *Psychologie.* Frankfurt, Fischer-Lexikon No. 6.

HYMAN, R. (1953): Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology, 45,* 188-196.

KLAUS, G. (1961): *Kybernetik in philosophischer Sicht.* Berlín, Dietz Verlag.

LUCE, R. D. Editor (1960): *Development in Mathematical Psychology.* Illinois, The Free Press of Glencoe.

MERKEL, J. (1885): Die zeitlichen Verhältnisse der Willenstätigkeit. *Philosophische Studien, 2,* 73-127.

MILLER, G. A.; BRUNER, J. S., y POSTMAN, L. (1954): Familiarity of letter sequences and tachistoscopic identification. *Journal of Genetic Psychology, 50,* 129-139.

MOLES, A. A. (1958): *Théorie de l'Information et Perception Esthétique.* París, Flammarion.

NEWELL, A., y SIMON, H. (1961): Computer simulation of human thinking. *Science, 134,* 2011-2017.

ROHRACHER, H. (1960): *Einführung in die Psychologie.* Viena, Urban und Schwarzenberg, 7.ª ed.

ROHRACHER, H. (1961): Regelprozesse im psychischen Geschehen. *Sitzungsberichte der Oesterreichischen Akademie der Wissenschaften, 23b,* No. 4, 3-21.

SCHOPENHAUER, A. (1847): *Über die vierfache Wurzel des Satzes vom zureichenden Grunde.* Disertación de 1813, 2.ª ed. Frankfurt, Hermann'sche Buchhandlung.

SCHWARTZKOPFF, J. (1962): Über paradoxe Beobachtungen an akustischen Nervenzellen mit digitaler Zeiteinteilung. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 3,* 97-109 (en prensa).

STEINBUCH, K. (1961a): Die Lernmatrix. *Kybernetik, 1,* 36-45.

STEINBUCH, K. (1961b): *Automat und Mensch. Über menschliche und maschinelle Intelligenz.* Berlín, Springer.

STEINBUCH, K. (1962): Bewusstsein und Kybernetik. *Gundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 3,* 1-12.

STEINBUCH, K., y FRANK, H. (1961): Nichtdigitale Lernmatrizen als Perzeptoren. *Kybernetik, 1,* 117-124.

VON CUBE, F. (1960): Zur Theorie des mechanischen Lernens. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft, 1,* 143-144.

WIENER, N. (1948): Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. *Actualités scientifiques et industrielles.* París, Hermann et Cie.

Clases y propiedades de las matrices de aprendizaje

Por P. MÜLLER

INDICE

1. Introducción ... 137
2. Principio de la matriz de aprendizaje ... 138
3. Conceptos fundamentales de la matriz de aprendizaje ... 140
   3.1. Combinación de propiedades, 140.—3.2. Conexiones condicionadas, excitación, 141.—3.3. Detección de valores máximos, 143.—3.4. Columnas dobles contradicentes, 143.
4. Clases de matrices de aprendizaje ... 144
   4.1. Matrices para señales binarias, 145.—4.2. Matrices para señales no binarias, 147.
5. Propiedades de las matrices de aprendizaje ... 151
6. Realización de estas matrices ... 152
7. Aplicaciones de estas matrices ... 154
Referencias bibliográficas ... 156

1. INTRODUCCION

La hazaña técnica esencial del siglo XIX residió en la construcción de máquinas que evitaran al hombre el trabajo mecánico, como hacen ver los ejemplos constituidos por las máquinas de vapor, los electromotores o los motores de combustión.

Una tendencia técnica característica del siglo XX consiste en inventar máquinas que eviten al hombre el trabajo sensorial y nervioso: recuérdense la puesta a punto de las modernas computadoras automáticas, mandadas mediante programas, o los autómatas que traducen de un idioma a otro, leen signos escritos o pueden entender una lengua hablada. A este respecto es patente que los sistemas técnicos han sobrepasado en muchos puntos a los orgánicos, por ejemplo, en cuanto a velocidad y fiabilidad, pero también que en otros muchos se han quedado atrás, como ocurre con la capacidad de aprender o con la facultad de formar invariantes.

En los sistemas orgánicos, las neuronas funcionan como elementos constructivos de los circuitos, en tanto que en los inorgánicos éstos se constituyen empleando como elementos, semiconductores, unidades ferro-

magnéticas tales como núcleos torales o transformadores de flujo, etc. También en cuanto a los principios de los circuitos se encuentran diferencias esenciales: en estos últimos sistemas suele ser posible una división de funciones muy clara (esto es, una distinción entre las partes del circuito que sirvan al almacenamiento de la información y las correspondientes a la ejecución de funciones lógicas), mientras que en los orgánicos sabemos que existen "circuitos" destinados a la formación de reflejos condicionados, en los que la operación lógica es función de la información de entrada y en los que, por tanto, se efectúan en una y la misma parte del circuito tanto aquella operación como el almacenamiento.

Los modelos que representan la manera de comportarse de los sistemas orgánicos emplean circuitos para simular los reflejos condicionados; sin embargo, con objeto de que puedan representar unos procesos de aprendizaje de mayor alcance es menester que posean un lujo tal de circuitos que excede los límites de las posibilidades de realización técnica.

Vamos a describir en lo que sigue un principio de formación de circuitos, la "matriz de aprendizaje" propuesta por STEINBUCH (1961a), que permite la representación por medio de un modelo de ciertos procesos de aprendizaje * y es, además, realizable con medios técnicos sencillos. Según el tipo de la información que se haya de tramitar, pueden distinguirse varias clases de matrices de aprendizaje; y, finalmente, presentaremos un panorama de propiedades y posibilidades de realización de estas matrices.

2. PRINCIPIO DE LA MATRIZ DE APRENDIZAJE

La matriz de aprendizaje (STEINBUCH, 1961a) es un circuito estructurado en forma de matriz en el que se encuentran de tal modo enlazadas gran número de "conexiones condicionadas" (véase más abajo), que es posible representar con ella algunos procesos de aprendizaje. Vamos a aclarar más en detalle su principio apoyándonos en la figura 1.

Como elementos característicos encontramos dos haces de conductores que se cruzan, y que constituyen las n columnas y las n filas del circuito matricial; en los puntos de cruce están colocados elementos de conexión, en los que se forman las "conexiones condicionadas", cuyas propiedades describiremos más pormenorizadamente en el apartado 3.2; indiquemos por ahora que la constitución de la "conexión condicionada" corresponde aproximadamente a los procesos sinápticos que conducen a la formación del "reflejo condicionado". A las columnas del circuito matricial se hace llegar una combinación de propiedades, $\{p\}$, consistente en las n propiedades $p_1, p_2, \ldots p_n$ (véase el apartado 3).

* ZEMANEK, 1961; PISKE, 1962.

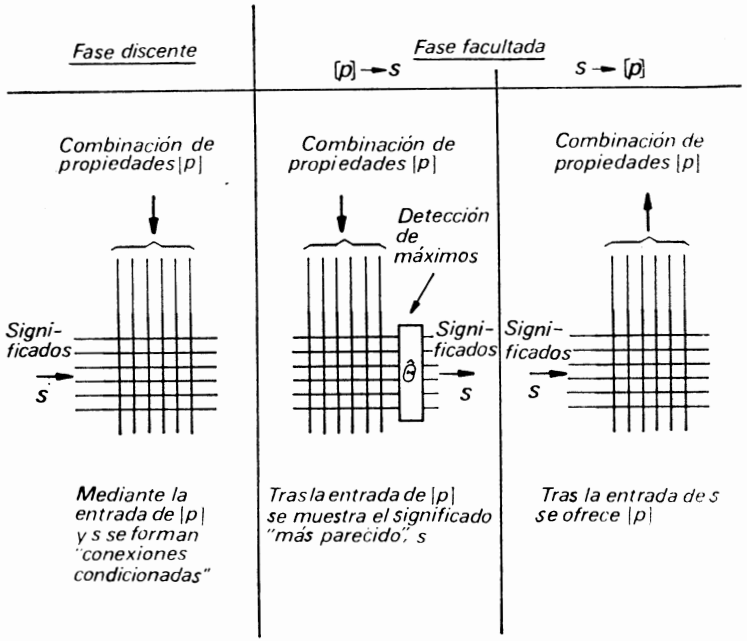


Fig. 1. Sobre el principio de la matriz de aprendizaje (STEINBUCH, 1961b).

Hay que distinguir dos modos de trabajo de la matriz de aprendizaje, a saber: la *fase discente* [*Lernphase*] y la *fase facultada* [*Kannphase*]. Durante la primera se consigue constituir la coordinación del significado s_i a una de las combinaciones de propiedades, $\{p\}_i$, introducida en las columnas (este significado queda representado cuando se hace llegar a la i-ésima fila una señal apropiada al mismo tiempo que se aplica la combinación de propiedades dicha): durante la entrada de la combinación $\{p\}_i$ y de la señal de fila que represente el significado s_i se forman unas "conexiones condicionadas" en virtud del reajuste automático de los elementos de conexión situados en los puntos de cruce de la i-esima fila y del conjunto de las columnas; proceso que puede reiterarse para distintas combinaciones de propiedades, activándose así una tras otra las distintas filas, hasta que queden ajustados los elementos de conexión de todas ellas.

En el apartado 3.2 especificaremos cómo se produce, en concreto, el ajuste de cada uno de estos elementos; baste decir, por ahora, que al completarse la fase discente las combinaciones de propiedades se encuentran coordinadas a los significados, y que esta coordinación reside en el hecho de que cada combinación esté "almacenada" o aprendida en una fila determinada.

Cuando en la fase facultada se le aplica a la entrada de las columnas

del circuito matricial una combinación de propiedades aprendida, la matriz de aprendizaje es capaz de indicar con una señal eléctrica (valiéndose de un circuito de detección de valores máximos) el significado aprendido. Si la combinación que durante esta fase se haga llegar a la matriz no pertenece al repertorio de combinaciones aprendidas, ésta señalará el significado de la combinación de propiedades aprendida que más se parezca a la introducida (y ésta es una característica esencial de la matriz de aprendizaje); caso —la introducción de una combinación no perteneciente al repertorio de las aprendidas— que puede suceder muy fácilmente, ya que, aunque se quiera introducir una que sin duda se haya aprendido durante la fase discente previa, cabe que sufra ciertas alteraciones en las conducciones de entrada a las columnas (es decir, que pase de la combinación original a otra que discrepe de ella en una o en varias propiedades). Designamos con la expresión de funcionamiento $\{p\} \rightarrow s$ esta forma de trabajo, en la que, por tanto, se presenta el significado de una combinación de propiedades que se haya introducido.

También es posible en la fase facultada la forma de trabajo inversa, esto es, el funcionamiento $s \rightarrow \{p\}$. Para ello se hace llegar a una fila una señal eléctrica que represente un significado determinado, s, y entonces se puede obtener en las columnas de la matriz de aprendizaje exactamente la combinación de propiedades aprendida.

3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA MATRIZ DE APRENDIZAJE

Vamos a especificar a continuación con mayor justeza algunos conceptos fundamentales, para poder exponer con su ayuda el modo de funcionar de la matriz de aprendizaje. Tales conceptos permiten, además, una clasificación sencilla de estas matrices.

3.1. Combinación de propiedades

Llamamos combinación de propiedades, $\{p\}_j$, a una combinación o conjunto de n propiedades, p_{j1}, p_{j2}, ... p_{jn}, en principio arbitrarias; y existen dos posibilidades de representar éstas. Pueden expresarse mediante números en sistema binario, por ejemplo, de modo que el número binario "1" corresponda a la existencia de una propiedad ($p_{jv} = 1$) y el "0" a su falta ($p_{jv} = 0$); así pues, una combinación de propiedades que conste de una serie de ellas representadas binariamente se transforma en una "palabra" de un código binario (por ejemplo, para cierta combinación tendremos $p_j = 101 \ldots 1 \ldots 0$). Y se tiene una representación vectorial de las combinaciones de propiedades cuando se conciben éstas como componentes de un vector de propiedades en un espacio vectorial cartesiano de n dimensiones; cuando las propiedades están dadas binariamente llegamos

a un cubo n-dimensional, cuyos vértices constituyen las imágenes de las posibles combinaciones de propiedades representables con n de éstas (no es posible tener más combinaciones que vértices). A las matrices que tramitan semejantes combinaciones de propiedades binarias les llamamos *matrices de aprendizaje para señales binarias.*

Ahora bien, las propiedades pueden asumir asimismo valores no binarios, que constituyan, por ejemplo, los rasgos físicos del objeto descrito en cada caso por la combinación de propiedades. E igualmente pueden formar los valores muestreados de una función del tiempo, o las magnitudes de estado de una situación del mundo exterior que sean unos valores continuos correspondientes a propiedades de una combinación de propiedades no binarias. También los valores de propiedades continuos pueden considerarse componentes de un vector de propiedades, que en el caso no binario puede adoptar cualesquiera posiciones en el espacio vectorial, sin estar sometido a las limitaciones vigentes en el binario. Designamos con el nombre de *matrices de aprendizaje para señales no binarias* las matrices de aprendizaje que permiten tramitar semejantes combinaciones de propiedades.

Por hablar más correctamente, habría que trazar una distinción entre los valores de propiedades cuantificados y los continuos, puesto que existen límites técnicos en cuanto a la posibilidad de distinguir escalonamientos cada vez más diminutos; y asimismo cabe retrotraer la cuantificación de los valores de propiedades en más de dos niveles, mediante una simple codificación binaria de éstos, a una representación binaria.

3.2. *Conexiones condicionadas, excitación*

En los puntos de cruce de las filas y columnas de la matriz de conmutación se encuentran unos elementos de conexión, gracias a los cuales pueden formarse las "conexiones condicionadas" (designamos con este nombre una función de acuerdo con la cual varía la conexión lógica en forma que depende de lo que haya ocurrido anteriormente). La formación de las conexiones condicionadas se consigue durante la fase discente, mediante el respectivo ajuste de los elementos de conexión; y, en consecuencia, cada elemento de conexión tiene que poseer una magnitud física ajustable (reversible o irreversiblemente) y dotada de una propiedad conexionadora *. Llamaremos x_{iv} al valor de dicha magnitud en el elemento de conexión situado en el punto de cruce entre la i-ésima fila y la v-ésima columna. Se ha de cumplir el requisito de que la conexión no varíe cuando haya una interrupción en la llegada de energía (desconexión del conjunto del aparato).

Los elementos de conexión son ajustables y, por consiguiente, pueden

* Entre filas y columnas.

emplearse como elementos de almacenamiento de las propiedades de una combinación de propiedades aprendida. Vamos a mostrar a continuación de qué manera se logra ajustarlos durante la fase discente.

En la fase facultada (o de funcionamiento $\{p\} \rightarrow s$) están ya dadas en las columnas de la matriz de aprendizaje las propiedades de las combinaciones de propiedades que se hayan presentado: mediante el efecto conexionador de los elementos de conexión surgen en las filas de la matriz señales de distintas magnitudes (decimos que las filas "se excitan"), y el elemento de conexión situado en el punto de cruce entre la v-ésima columna y la i-ésima fila proporciona un incremento de excitación, $\Delta\theta_{iv}$, a la excitación global, θ_i, de la i-ésima fila.

El incremento de excitación de cada elemento conexionante depende tanto de la conexión que se haya ajustado, x_{iv}, como de la propiedad correspondiente, p_{jv}, de la combinación de propiedades $\{p\}_j$. Podemos escribir, pues:

$$\Delta\,\theta_{iv} = \mathrm{F}\,\{p_{jv}\,;\,x_{iv}\} \quad ; \quad i = 1,2,\ldots m$$

Si se tiene ahora en cuenta que el ajuste de los elementos de conexión de la i-ésima fila depende durante la fase discente de las propiedades de la combinación de éstas que se haya de aprender y que, por lo tanto, x_{iv} es función de p_{iv}, hemos de admitir que

$$\Delta\,\theta_{iv} = \mathrm{F}\,\{p_{jv}\,;x_{iv}(p_{iv})\} \quad ; \quad i = 1,2,\ldots m$$

Tenemos así una relación con dos "grados de libertad", a saber: por una parte, la vinculación funcional que se haya formado en la fase discente entre la conexión x_{iv} y la propiedad aprendida, p_{iv}, y por otra, la vinculación subyacente a la fase facultada entre la propiedad que se presente durante esta fase, p_{jv}, y la conexión x_{iv}; y, en principio, ambas relaciones pueden ser cualesquiera (precisamente lo que permite llegar a unas clases típicas de matrices de aprendizaje es la determinación específica de unas vinculaciones funcionales entre x_{iv} y p_{iv}, por un lado, y entre x_{iv} y p_{jv}, por otro). Debe advertirse aquí que no es preciso que tal vinculación funcional se constituya en un solo proceso discente: por lo menos para la matriz de aprendizaje binaria (véase el apartado 4.1), tiene un interés especial el caso del aprendizaje reiterado a partir de signos eventualmente alterados; y las relaciones aludidas dependen en primer término del tipo empleado de los elementos de conexión. La excitación global de la i-ésima fila es la suma de los incrementos de excitación de todos los elementos de conexión individuales:

$$\theta_i = \sum_{v=1}^{n} \Delta\theta_{iv} \qquad i = 1,2,\ldots m$$

ley de sumación que se funda en la estructura de la matriz (en concreto, a través del hecho de que la totalidad de los elementos de conexión de

una fila están unidos entre sí), y es solamente válida cuando se hacen llegar simultáneamente a las columnas del circuito matricial todas las propiedades de la combinación de éstas que sea.

3.3. Detección de valores máximos

El conjunto de todas las filas de la matriz de aprendizaje está unido a un circuito de determinación de máximos, que entra en acción sólo en la fase facultada (y aquí únicamente en el funcionamiento $\{p\} \rightarrow s$). La tarea que le está encomendada es la de reconocer las filas de excitación máxima e indicar cuáles son mediante una señal.

En el apartado 6 reseñaremos las formas de ejecución de los circuitos de valores máximos.

3.4. Columnas dobles contradicentes

Para cada propiedad de una combinación de propiedades —independientemente de que se la haga llegar en forma binaria o de que sea una magnitud continua— se prevé un par de columnas (dejando de lado sistemas especiales de realización técnica). A este respecto es característico que en ningún momento se encuentre ajustado a una fila más que un elemento de conexión (de los [dos que corresponden a los] dos puntos de cruce con la pareja de columnas); y de aquí se deriva la denominación de "columnas dobles contradicentes [*kontradiktorische*]" para estas pare-

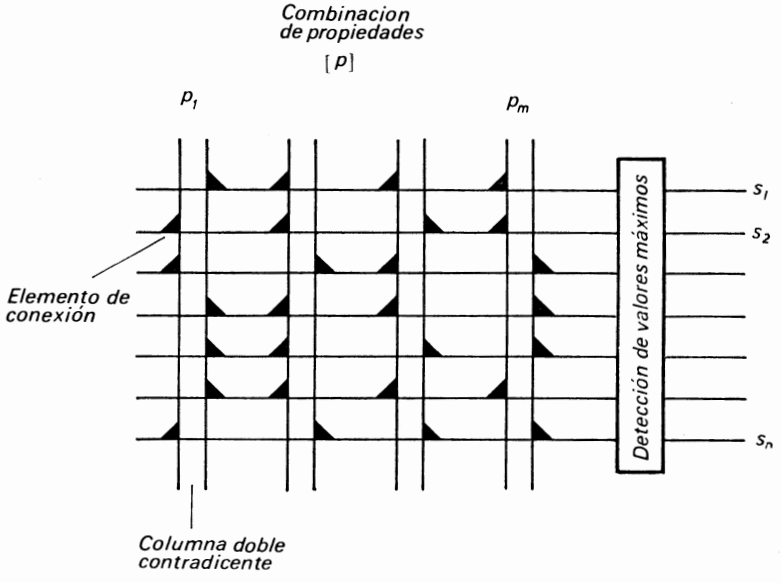


Fig. 2. Matriz de aprendizaje.

jas de columnas. (La conexión cilíndrica constituye una excepción; FRANK, 1961.)

Las propiedades binarias se introducen en las columnas dobles contradicentes, de suerte que en caso de que exista la propiedad ($p_{jv} = 1$) llegue una señal eléctrica a la columna izquierda, por ejemplo, y en caso de que falte ($p_{jv} = 0$) llegue a la columna derecha. Se trata de un expediente imprescindible para que, si es que falta una propiedad, se tenga información susceptible de ser evaluada, así como para evitar que una combinación de propiedades tal como la $\{p\} = 1111 \ldots 11$ se sobreponga a todas las demás combinaciones.

También cuando se emplean señales no binarias como [representantes de las] propiedades de una combinación de éstas tiene pleno sentido usar columnas dobles para representar los valores negativos de las propiedades; entonces, una señal que represente un valor positivo se aplicará a la columna izquierda, por ejemplo, y las que indiquen un valor negativo a la columna derecha.

En la figura 2 puede verse una simbolización global de los conceptos fundamentales que acabamos de explicar.

4. CLASES DE MATRICES DE APRENDIZAJE

Según se disponga de los dos grados de libertad de la relación presentada en el apartado 3.2,

$$\triangle \theta_{iv} = F \{ p_{jv} \; ; x_{iv}(p_{iv}) \} \quad ; \quad i = 1,2, \ldots m$$

se obtienen tipos de matrices de aprendizaje que se comportan de un modo característico. En líneas generales, tenemos dos clases de estas matrices, determinadas por el modo de representar las propiedades: se trata de la distinción entre las matrices de aprendizaje para señales binarias y las correspondientes a señales no binarias (que ya hemos mencionado en el apartado 3.1).

Se llega a las matrices de aprendizaje hasta ahora estudiadas (STEINBUCH, 1961a; STEINBUCH y FRANK, 1961) cuando, por lo pronto, se efectúa en la fase discente el ajuste automático de los elementos de conexión de una fila, de tal modo que las conexiones x_{iv} se ajusten proporcionalmente a las señales que, introducidas en las columnas de la matriz de conmutación, encarnen la combinación de propiedades que haya que aprender; se tiene, pues:

$$\dot{x}_{iv} = \mathbf{k} \cdot p_{iv}$$

(Para ejecutar técnicamente la matriz de aprendizaje es preciso realizar físicamente esta relación.)

A ello se añade la elección, para la fase facultada, de una vinculación multiplicativa entre la propiedad introducida p_{jv} y la conexión x_{iv}, por ejemplo, en la siguiente forma:

$$\triangle \theta_{iv} = p_{jv} \cdot x_{iv} \, (p_{iv})$$

(Los elementos de conexión hasta ahora técnicamente ejecutados cumplen esta relación.)

4.1. Matrices de aprendizaje para señales binarias

Vamos a describir el modo de funcionar de la matriz para señales binarias (también llamada "matriz binaria de aprendizaje") apoyándonos en la figura 3, en la que se ve una *matriz de significados*, que trabaja en la fase facultada; y llamamos de este modo a una matriz de conmutación que no esté preparada para funcionar en fase discente: en la que, por tanto, el ajuste de los elementos de conexión se efectúe, por ejemplo, a mano, y que simplemente permita el funcionamiento en fase facultada. Así, en el ejemplo de la figura 3 se ha introducido en las cuatro filas de la conmutadora matricial un repertorio de cuatro combinaciones de propiedades binarias, $\{p\}_1$, ... $\{p\}_4$, mediante el correspondiente ajuste de los elementos de conexión de dichas filas. Podemos transcribir las combinaciones de propiedades aprendidas mediante "palabras" de un código: $\{p\}_1 = 000001$, $\{p\}_2 = 010111$, $\{p\}_3 = 101011$ y $\{p\}_4 = 111101$.

Los elementos de conexión se forman mediante conductancias: la conexión corresponde al grandor, G, de la conductancia. El ajuste de los elementos de conexión se ejecuta de acuerdo con la relación $x_{iv} = k \cdot p_{iv}$ en el caso de la columna izquierda, y con la $x'_{iv} = k \cdot \bar{p}_{iv}$ en el caso de la derecha, siendo $k = G$ (en el supuesto de que las propiedades sean magnitudes binarias). Las conexiones x_{iv} y x'_{iv} de los elementos de conexión correspondientes al punto de cruce de la i-ésima fila con la v-ésima columna doble toman el valor G para $p_{iv} = 1$ y $\bar{p}_{iv} = 1$, respectivamente, y en todos los demás casos son iguales a cero. (Indicaremos en el apartado 6 cómo puede realizarse técnicamente el ajuste de los elementos de conexión de forma que se cumplan estas reglas.)

La combinación de propiedades a introducir, $\{p\}_j$ (transcribible, de acuerdo con lo dibujado en la figura 3, por 010111), se logra representar mediante la tensión continua U, que se establece siempre en la columna izquierda cuando la propiedad correspondiente —de la combinación de propiedades presentada— asume el valor binario 1, y en caso contrario se establece en la columna derecha. El efecto de la conexión que efectúan las conductancias en los puntos de cruce de las filas y columnas consiste en que cuando llega a éstas la tensión presentada circulan por ellas unas corrientes definidas, que representan la excitación de las filas;

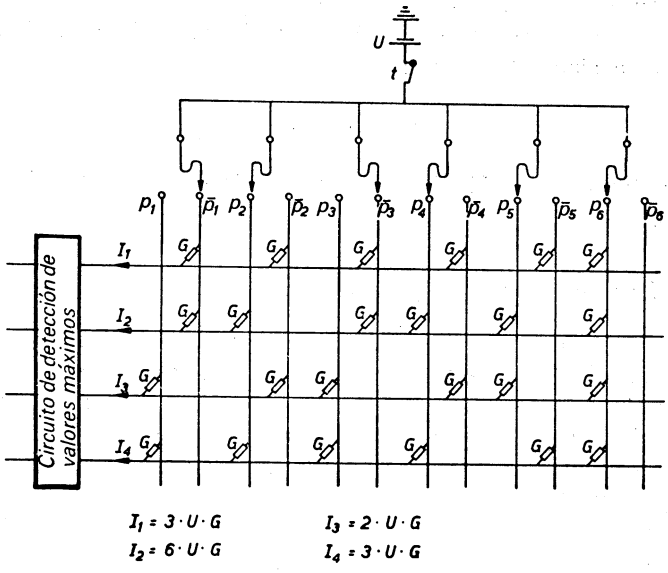


Fig. 3. Principio de la matriz binaria de significados (STEINBUCH, 1961a).

en esta situación es válida la vinculación multiplicativa entre la conexión y la propiedad que llegue, de modo que el incremento de excitación, $\Delta\theta_{iv}$, es el producto de la tensión existente, U, y la conductancia de la conexión, G:

$$\Delta\,\theta_{iv} = G.U$$

En el ejemplo que hemos ofrecido la excitación es una corriente, y la corriente máxima circulará por la fila que presente el número más elevado de elementos de conexión ajustados (mediante la conexión G) al llegar la combinación de propiedades que sea: la excitación global alcanza un máximo absoluto de la fila cuya combinación de propiedades almacenada —gracias a la disposición de las conductancias— sea idéntica a la combinación que se presente.

En la figura 3 hemos señalado la magnitud de las corrientes que de hecho circularían: la fila 2 sería la dotada de excitación máxima, pues la combinación de propiedades aprendida por esta fila concuerda con la combinación que se presenta en la totalidad de sus propiedades.

En las matrices binarias de aprendizaje hasta ahora descritas se supone que la formación de las conexiones condicionadas se efectúa en un único paso discente, y que, por tanto, cada conexión adquiere inmediatamente el valor dado por $x_{iv} = k \cdot p_{iv}$, fórmula carente de toda constante *.

* Esto es, en la que G no se multiplica por ninguna constante para dar el valor k, pues, como ya se ha indicado, $k = G$. *(N. del T.)*

Frente a este proceso discente que se efectúa en un solo paso se encuentra el de índole progresiva, caracterizado por alcanzar las conexiones el valor dado por $x_{iv} = k \cdot p_{iv}$ en pasos discentes sucesivos y subsiguientes, que dependen de la medida en que la combinación de propiedades inicialmente presentada se mantenga durante sus repetidas apariciones en la fase discente (esto es, no sufra modificaciones); y en este caso pueden tenerse en cuenta —bajo la forma de un factor de ponderación dado para cada una de las conexiones— cualesquiera regularidades estadísticas que actúen durante el proceso de aprendizaje. Asimismo es posible "reaprender" unas combinaciones de propiedades ya aprendidas, de modo que los factores de ponderación que afectan a las conexiones se modifiquen en forma correspondiente a la modificación que experimenten —supuesto que sea en unas pocas propiedades— aquellas combinaciones; lo cual podemos representar formalizadamente haciendo que en $x_{iv} = k \cdot p_{iv}$ el factor k exprese el factor de ponderación.

4.2. Matriz de aprendizaje para señales no binarias

La matriz de aprendizaje para señales no binarias, que hemos denominado abreviadamente "matriz no binaria de aprendizaje", se encuentra en situación de tramitar combinaciones de propiedades cuyas propiedades componentes asuman valores continuos. En lo que respecta a la fase facultada, tenemos, con respecto a las matrices binarias de aprendizaje, de que nos hemos ocupado arriba, la siguiente diferencia (si de momento no tenemos en cuenta el aprendizaje progresivo en el caso binario): ahora las conexiones no adoptan todas igual valor, sino que son proporcionales a los valores de propiedades que haya que aprender. En la matriz binaria de aprendizaje —teniendo ahora en cuenta el aprender progresivo—, la conexión constituye una medida frecuencial, en tanto que en la no binaria es medida de una propiedad; y si se quiere introducir un factor estadístico de ponderación también en la matriz no binaria, es menester que se ajusten independientemente dos magnitudes del elemento de conexión cuyos grandores sean mutuamente dependientes.

El modo de trabajo de la fase facultada es igual al correspondiente en la matriz binaria de aprendizaje. Vemos en la figura 4 una matriz no binaria de significados que, por razones de sencillez en la explicación, carece de columnas dobles (y por ello este circuito matricial queda confinado a valores positivos de las propiedades). También aquí representaremos los elementos de conexión mediante conductancias cuyos grandores sean proporcionales a los valores de propiedades que tengan las combinaciones de propiedades (aprendidas en las filas respectivas); y tales combinaciones han de estar "normalizadas" del modo apropiado (véase más abajo). Cada combinación de propiedades estará representada mediante una combinación de tensiones proporcionales a sus propiedades, tensiones que se

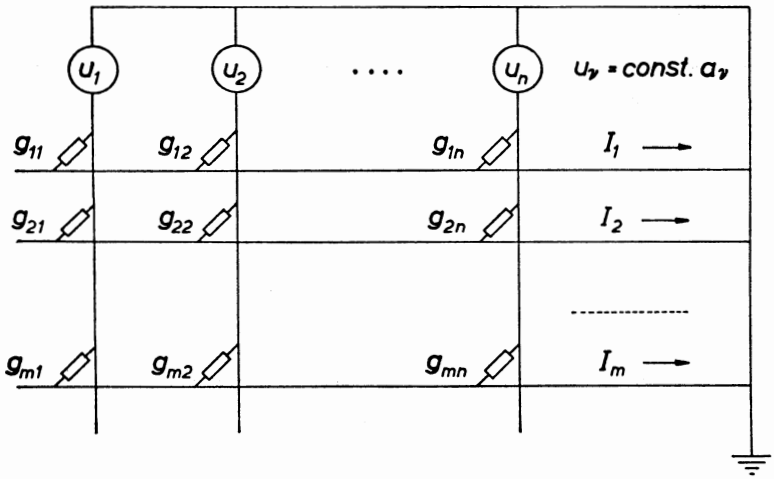


Fig. 4. Principio de la matriz no binaria de significados (STEINBUCH y FRANK, 1961).

aplicarán a las columnas del dispositivo; y por las filas circularán unas corrientes determinadas por el grandor de las conductancias y las tensiones, corrientes que formarán la excitación global de la fila, que se calcularán sumando los incrementos de excitación propios del caso de los elementos de conexión de la i-ésima fila.

Las filas que lleven la corriente máxima serán aquellas cuyos elementos de conexión —en el ejemplo de la figura 4, cuyas conductancias— representen una combinación de propiedades que sea idéntica (o lo más parecida posible) a la combinación que se presente. Y la detección de valores máximos, que ya hemos descrito, tiene la misión de señalar cuáles son tales filas de corriente máxima.

Pero lo que acabamos de decir sólo es cierto en el supuesto de que las combinaciones de propiedades aprendidas hayan sido "normalizadas". Vamos a indicar en lo que sigue de qué modo se consigue la normalización durante la fase discente.

Cuando se presente la combinación de propiedades $\{p\}_j$, la excitación global —esto es, la corriente I_i— de la i-ésima fila, en la que se habrá aprendido la combinación de propiedades $\{p\}_i$, será:

$$I_i = \sum_{\nu=1}^{n} p_{j\nu} \cdot g_{i\nu} \quad ; \quad i = 1,2,\ldots m$$

si admitimos que se haya ajustado, como conexión, la conductancia $g_{i\nu}$, de acuerdo con $x_{i\nu} = k \cdot p_{i\nu}$; mas esta última expresión equivale al producto escalar de dos vectores, p_j y g_i, cuyas componentes sean $p_{j\nu}$ y $g_{i\nu}$, respectivamente, de modo que la podemos escribir también así:

$$I_i = |\, p_j \,| \cdot |g_i| \cdot \cos \varphi_{ij} \quad ; \quad i = 1,2,\ldots m$$

Puesto que, según hemos mostrado al comienzo (en el apartado 3.1), cabe interpretar las combinaciones de propiedades como vectores y dado que, además, podemos considerar las conductancias, g_{iv}, como componentes de un vector de su misma naturaleza, y φ_{ij} representa el ángulo formado por estos dos vectores, es natural que elijamos este ángulo, φ_{ij}, como criterio de parecido en la comparación entre las combinaciones de propiedades que se presenten y las aprendidas. Y ya que en la expresión anterior de la excitación de las filas entra el ángulo φ_{ij}, formado por aquellos dos vectores, simplemente como variable, es necesario exigir que se cumpla la condición $g_i = C^{te}$ dentro de cada fila; de lo cual se deriva la siguiente condición de normalización para las combinaciones de propiedades que hayan de aprenderse:

$$\sum_{v=1}^{n} p_{iv}^2 = \text{Cte.}$$

En las matrices no binarias de aprendizaje recurriremos al ángulo entre los vectores que representen las combinaciones de propiedades que se hagan llegar y las ya aprendidas como criterio de parecido (si dicho ángulo es cero, ambas combinaciones serán idénticas). El circuito de detección de máximos señala las filas que hayan aprendido una combinación de propiedades que —en la representación vectorial— forme el ángulo mínimo con la combinación presentada.

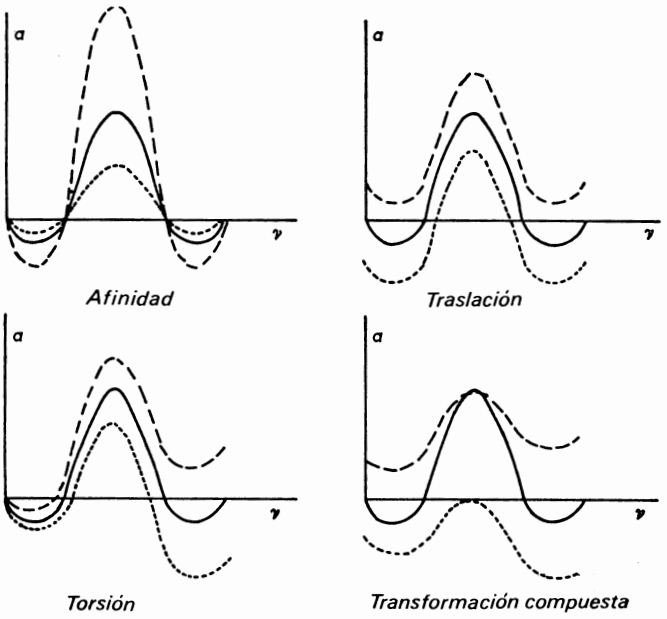


Fig. 5. Diversas formaciones invariantes posibles (STEINBUCH y FRANK, 1961).

A partir del hecho de que el ángulo citado se utiliza como criterio de parecido, puede deducirse una propiedad típica de la matriz no binaria de aprendizaje, a saber: la invariancia con que se efectúa el reconocimiento de las combinaciones de propiedades frente a las transformaciones afines que puedan sufrir las combinaciones que se presenten. (Someter una combinación de propiedades a una transformación afín significa que se multiplican todas y cada una de sus propiedades por un número real y positivo.) Cuando se aplica una transformación afín a una combinación de propiedades, la dirección del vector de propiedades correspondiente permanece intacta, y, por tanto, lo mismo ocurre con el reconocimiento aludido, puesto que se apoya simplemente en la dirección de tal vector.

En la figura 5 se representan algunas transformaciones de una curva (por ejemplo, la gráfica de una función del tiempo). Si se nos ofrece una combinación de propiedades que, en lugar de representar las propiedades de la función original, corresponda a las derivadas de la función, se consigue la invariancia frente a la traslación; y si lo que se emplean son las segundas derivadas, la invariancia frente a la torsión.

En caso de que en una combinación de propiedades entren también valores de propiedades negativos, se utiliza un dispositivo dotado de columnas dobles (véase el apartado 3.4); en la figura 6 puede verse un circuito matricial de esta índole.

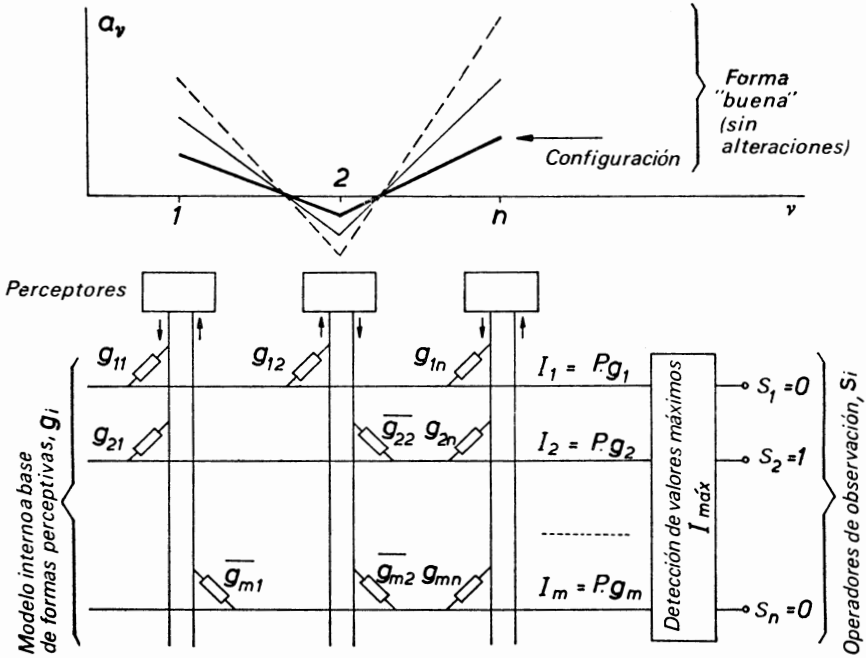


Fig. 6. Matriz no binaria de aprendizaje para propiedades negativas (STEINBUCH y FRANK, 1961).

5. PROPIEDADES DE LAS MATRICES DE APRENDIZAJE

En el apartado 2 hemos mencionado ya dos posibilidades fundamentales de trabajo de las matrices de aprendizaje: el funcionamiento $\{p\} \rightarrow s$ y el $s \rightarrow \{p\}$, ambos en la fase facultada (véase la fig. 1). En el primer tipo de funcionamiento, a la entrada de una combinación de propiedades sucede la indicación del significado de la combinación aprendida más parecida a aquélla (y la indicación de su significado exacto en caso de que la combinación presentada pertenezca al repertorio de las ya aprendidas). En el tipo opuesto de funcionamiento, o $s \rightarrow \{p\}$, cuando se hace llegar a una fila una señal apropiada, que represente un significado determinado, se produce como salida la combinación de propiedades aprendidas que esté coordinada en dicha fila.

En la figura 7 se muestran dos montajes más de dos matrices, que podemos denominar dipolo de matrices de aprendizaje: pueden acoplarse entre sí o bien las filas (acoplamiento en *psp*) o las columnas (acoplamiento en *sps*) de las dos matrices de aprendizaje.

Cuando se tiene el acoplamiento en *psp*, una combinación de propiedades, $\{p\}_\alpha$, se transforma en una segunda combinación, $\{p\}_\beta$, de igual significado que aquélla: el elemento de enlace está constituido por este significado. Con este acoplamiento puede simularse, por ejemplo, el proceso de traducción de un idioma a otro: las combinaciones de propiedades $\{p\}_\alpha$ y $\{p\}_\beta$ son palabras de los lenguajes de objetos α y β, respectivamente, mientras que s es el "significado" común a ambas.

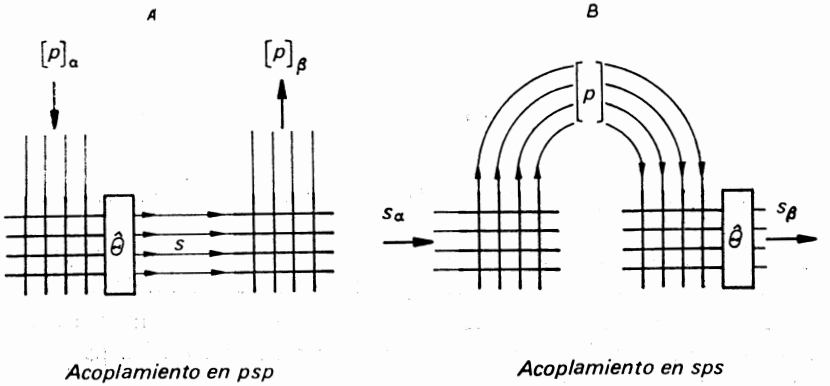


Fig. 7. Dipolo de M. A. (STEINBUCH, 1961b).

Cuando se efectúa el acoplamiento en *sps* se logra transformar un significado, s_α, en otro distinto, s_β, siendo aquí la combinación de propiedades común, $\{p\}$, el elemento de enlace. Este tipo de unión de circuitos

puede servir de modelo, por ejemplo, para la comunicación entre seres humanos, pues en ésta se transmiten señales convenidas que para el expedidor y el perceptor poseen un significado convenido.

Tenemos una tercera posibilidad de unión de los circuitos de dos matrices de aprendizaje mediante la estratificación (fig. 8), en la que, valiéndose de un circuito intermedio apropiado, los significados que pueden extraerse sucesivamente de la primera matriz sirven de combinación de propiedades para la segunda. Las matrices de aprendizaje estratificadas pueden utilizarse como modelo de los procesos de reconocimiento; así, del reconocimiento de palabras a partir de las letras aisladas; en este caso se introduciría en la primera matriz de aprendizaje, como combinación de propiedades, $\{p\}_\alpha$, la distribución del ennegrecimiento de cada letra, y el significado que se indicase en consecuencia, s_α, señalaría la letra co-

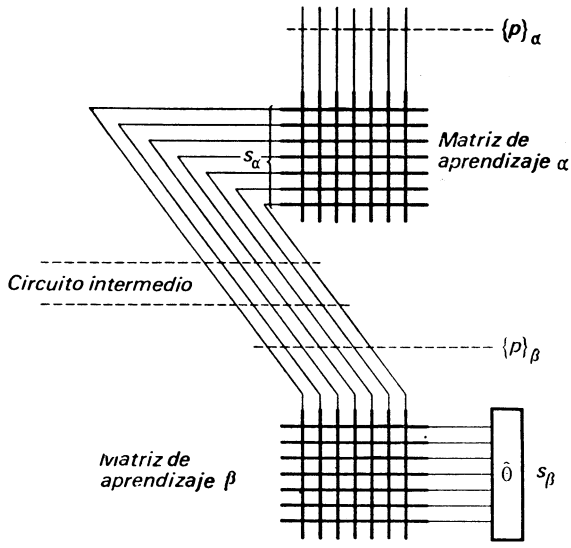


Fig. 8. Estratificación de matrices de aprendizaje (según STEINBUCH, 1961b).

rrespondiente; y varias letras formarían una combinación de propiedades, $\{p\}_\beta$, para la segunda matriz, que señalaría entonces la palabra s_β. Es posible ampliar esta estructura, que permite así simular la capacidad de los sistemas orgánicos de reconstruir el significado de las palabras del código alteradas (palabras mal escritas).

6. REALIZACION DE ESTAS MATRICES

En la realización de las matrices de aprendizaje podemos distinguir tres clases de problemas: en primer lugar, la fabricación de unos elemen-

tos de conexión apropiados; en segundo, la puesta a punto de un procedimiento conveniente de ajuste automático de tales elementos durante la fase discente, y, finalmente, la ejecución técnica de la fase facultada, incluida la detección de valores máximos.

En lo que respecta a los elementos de conexión, existe, por lo pronto, el requisito de que sean ajustables automáticamente, esto es, en forma proporcional a las propiedades de la combinación de propiedades que haya de aprenderse y teniendo en cuenta un factor de ponderación (véase el apartado 4.1). En la mayoría de los casos las conexiones efectuadas han de ser reversibles, y conservarse sin modificación cuando se interrumpa la llegada de energía.

De los elementos de conmutación conocidos, los que pueden ser más idóneos como elementos de conexión parecen ser los ferromagnéticos del tipo de los núcleos torales o los transformadores de flujo, cuya inducción determina la conexión que efectúan. En casos especiales pueden emplearse también sistemas de condensadores (electrolíticos o de papel metalizado), así como células electroquímicas, cuya conductancia cabe utilizar como conexión (HÖNERLOH y KRAFT, 1961).

En la fase discente se suscita en las unidades ferromagnéticas una variación de la inducción que se conserva sin modificaciones incluso sin entrada de energía, y que es reversible. En las células electroquímicas se producen, en virtud de reacciones iónicas, variaciones de la conductancia, que, por lo demás, son, en general, irreversibles. En el caso de los sistemas de condensadores se consigue una variación de capacidad por perforación del aislamiento —proceso siempre irreversible.

En la fase facultada se presenta, en definitiva, la tarea de conseguir —mediante un proceso apropiado que sirva de excitación de la fila— una señal que sea proporcional a la suma de los productos formados con las conexiones de una fila y la combinación de propiedades presentada; para cumplir este requisito basta que esta combinación misma inquiera el estado de los elementos de conexión (las conexiones) y que transmita como excitación una señal que posea la propiedad de ser proporcional a la suma de los productos de las conexiones de una fila por las propiedades de la combinación de ellas presentada; y por ello es preciso cumplir el requisito auxiliar de que se inquieran de tal modo los elementos de conexión que no se influya de modo permanente sobre las conexiones respectivas.

En la figura 9 presentamos una visión de conjunto de las diversas posibilidades de realización.

En las matrices de aprendizaje técnicamente realizadas se consigue la detección de valores máximos mediante circuitos electrónicos (en los que se emplean diodos semiconductores y transistores). Todos los circuitos de detección de máximos poseen un elemento de comparación no lineal, en el que se comparan las excitaciones de fila individuales con una magnitud de referencia, y un indicador, que señala la fila máximamente excitada.

	UNIDADES FERROMAGNÉTICAS		CONDENSADORES	CÉLULAS ELECTROQUÍMICAS	
	Núcleo toral Núcleo de láminas	*Transformador de flujo*	*Electro- líticos Ag-SiO_2-Ag*	*De papel metali- zado*	Ag-AgBr-Ag	*Electrolito de Ta-Ag*
Procesos durante la fase discente	Activación de la corriente ↓ Variación de la inducción		Perforación del aislamiento ↓ Variación de la capacidad		Emigración de iones de Ag, formación de hilos de Ag ↓ Aumento de la conductancia	Liberación de Ag, formación de Ta_2O_5 ↓ Disminución de la conductancia
Conexiones condicionadas	REVERSIBLES		IRREVERSIBLES		IRREVERSIBLES	IRREVERSIBLES (REVERSIBLES)
Activación de la fase facultada	Corriente de alta frecuencia	Corriente de alta frecuencia o impulso de corriente	Tensión de alta frecuencia o impulso de tensión		Par de impulsos bipolares	
Magnitud en la que se mide la excitación	Valor de la tensión de los armónicos (en una fase determinada)	Valor de la tensión inducida	Amplitud de la tensión		Amplitud de la corriente	Amplitud de la tensión

Fig. 9. Posibilidades de realización de la matriz de aprendizaje (HÖNERLOH y KRAFT, 1961).

Señalemos en este punto que las estructuras del tipo de las matrices de aprendizaje pueden construirse fácilmente con modelos de neuronas; y es posible efectuar la detección de valores máximos de modo que la fila máximamente excitada (representada, en tal caso, por una neurona) actúe inhibidoramente sobre las demás filas.

7. APLICACION DE ESTAS MATRICES

Presentemos, finalmente, un panorama de algunas aplicaciones posibles de las matrices de aprendizaje.

Cuando se tienen que reconocer signos o elementos lingüísticos, ocurre muchas veces que los rasgos ópticos o acústicos son parcialmente desconocidos, de modo que en principio no se puede especificar ninguna estructura formada por circuitos que permita llevar a cabo el reconocimiento con perfección. Pero la matriz de aprendizaje, con todo, se adapta a los rasgos del caso y admite el cambio de caracteres tipográficos (y, tal vez, de caligrafía); e igualmente son posibles con estas matrices procesos de acomodación a las peculiaridades individuales del hablante.

En la traducción de una lengua a otra, las matrices de aprendizaje presentan muchas ventajas para la adaptación del vocabulario interno a unos textos determinados.

Para la técnica de la documentación se ofrecen nuevas posibilidades, en virtud del hecho de que la detección de valores máximos se apoya únicamente en la información que haya de encontrarse o clasificarse, y que, por tanto, no requiere ningún sistema de direcciones. E igualmente se ofrecen nuevos campos de aplicación para los pronósticos meteorológicos, la diagnosis médica, la regulación del tráfico y la regulación y mando automáticos (GÖRKE *et al.*, 1961).

RESUMEN

La matriz de aprendizaje es un circuito estructurado en forma de matriz en el que están enlazadas gran número de *conexiones condicionadas* de suerte tal que puedan tener lugar procesos de aprendizaje sencillos.

En general, en una matriz de esta índole se produce la coordinación de una combinación de propiedades (o configuración) y un significado, ambos transformados en señales eléctricas por medio de interruptores manuales o de otro dispositivo semejante. La coordinación se lleva a cabo automáticamente durante la *fase discente* de la matriz de aprendizaje; una vez terminada ésta comienza la *fase facultada* o de trabajo, en la que, valiéndose de un dispositivo de detección de máximos, se reproduce —asimismo en forma de una señal eléctrica— el significado ya aprendido de una combinación de propiedades (o configuración) que se haya hecho llegar anteriormente al circuito de las columnas de la matriz.

Hemos examinado los conceptos fundamentales de las matrices de aprendizaje, en particular la combinación de propiedades (o configuración) que se presenta al circuito matricial, los elementos de conexión situados en los puntos de cruce entre filas y columnas, la excitación producida mediante tales elementos en las diversas filas cuando se hace llegar a la matriz una configuración y, finalmente, la detección e indicación de la fila más excitada. Nos hemos ocupado después de las distintas clases de las matrices de aprendizaje, y hemos distinguido dos grupos principales, el de las matrices binarias y un tipo especial no binario —a saber, el tipo perceptivo.

Una descripción de las diferentes funciones de las matrices de aprendizaje binarias y perceptivas señala la posibilidad de simular más ajustadamente mediante matrices de aprendizaje diversas propiedades del sistema nervioso y del cerebro. Esencialmente existen dos modos de funcionamiento opuestos entre sí: es posible acoplar

dos matrices de aprendizaje, bien en paralelo, bien en serie; el acoplamiento en paralelo da lugar a un dipolo (subjetivo u objetivo) de matrices de aprendizaje, mientras que al acoplarlas en serie se consigue una estratificación de matrices, que puede utilizarse como modelo de ciertos procesos de reconocimiento que acontecen en el cerebro. También la matriz perceptiva forma algunos invariantes en el reconocimiento de configuraciones representadas análogamente, y hemos descrito un modelo sencillo de este tipo de matriz.

Nos hemos ocupado, para terminar, de los principios fundamentales y los métodos técnicos de construcción de las matrices de aprendizaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

FRANK, H. (1961): Die Lernmatrix als Modell für Informationspsychologie und Semantik. *Lernende Automaten.* Suplemento de *Elektronische Rechenanlagen, 3,* 101-108.

GÖRKE, W.; KAZMIERCZAK, H., y WAGNER, S. W. (1961): Anwendungen der Lernmatrix. *Lernende Automaten.* Suplemento de *Elektronische Rechenanlagen, 3,* 84-100.

HÖNERLOH, H. J., y KRATF, H. (1961): Technische Verwirklichung der Lernmatrix. *Lernende Automaten.* Suplemento de *Elektronische Rechenanlagen, 3,* 75-83.

PISKE, U. (1962): *Lernende Automaten. Realisierungs- und Anwendungsmöglichkeiten lernender Automaten under besonderer Berücksichtigung der Lernmatrizen nach K. Steinbuch.* Vortrag Kybernetische Tagung der Akademie der Wissenschaften Berlin, 20-23 de marzo de 1962.

STEINBUCH, K. (1961a): Die Lernmatrix. *Kybernetik, 1,* 36-45.

STEINBUCH, K. (1961b): Schaltungen mit der Lernmatrix. *Lernende Automaten.* Suplemento de *Elektronische Rechenanlagen, 3,* 63-68.

STEINBUCH, K., y FRANK, H. (1961): Nichtdigitale Lernmatrizen als Perzeptoren. *Kybernetik, 1,* 117-124.

ZEMANEK, H. (1961): Logische Beschreibung von Lernvorgängen. *Lernende Automaten.* Suplemento de *Elektronische Rechenanlagen, 3,* 9-25.

La homeóstasis sensorial

Por GEORGE W. ZOPF, Jr.

Desde que tuvimos la primera oleada de conciencia sabemos que la visión ante el ojo de la mente no concuerda con el mundo objetivo del hombre de ciencia; por lo general hemos considerado que esta discrepancia era un defecto, y sólo recientemente hemos empezado a sospechar que sólo percibimos lo que ADALBERT AMES llamaba "lo que a la mente le parece más fácil que sea eso que hay ahí". Desde la caverna platónica, el espejo oscuro de San Pablo y los ídolos de Bacon hemos mirado nuestra visión como algo defectuoso; pero acaso lo que hemos castigado y deplorado como una defección no sea otra cosa que nuestro nuevo amigo, la selección; y tal vez no sea demasiado pronto para examinar los mecanismos de tal selección, e incluso su finalidad.

Me parece probable que justamente la objetividad de la ciencia, en particular la de su subsección —en cuanto a actitud— de la cibernética, se encuentre hoy apremiada a ocuparse de la subjetividad de la percepción. Hemos sido capaces de mirar gran parte del mundo como un mecanismo, e incluso de interpretarnos a nosotros mismos como máquinas; tal vez ello nos dé títulos para ocuparnos de la máquina egoísta, cuya actividad se refiere tanto a su propia situación como a la multiplicidad del mundo en que se encuentra a sí misma: quizá podamos ahora hacer ver que no cabe esperar que los organismos complejos que viven y sobreviven en medios complejos posean objetividad sensorial. El consumado arte de la regulación implica la selección (o reducción de la variedad), cosa que viene a ser lo mismo que una especie de ceguera voluntaria, cierta incapacidad de atender a cuanto no sea pertinente para la tarea de mantener dentro de unos límites determinado conjunto de variables privadas y esenciales.

El *eidolon* sensorial del organismo vivo y superviviente *no* es el del científico, que describe una manzana como un fruto suave, redondo y colorado, sino más bien el del niño, que sostiene que la manzana es para comerla. No tanto "percibimos" cuanto "percibimos como"; los elementos ónticos de nuestro mundo no están envueltos en los términos de una lógica exterior, sino de una estrategia interior: no se refieren a lo verdadero, sino a lo ventajoso.

De lo cual se sigue que no llegaremos a comprender las complejidades de la percepción, ni su papel en la vida integrada del organismo, mientras sólo podamos verla como una elaboración estricta y nítida de homeomorfos de acontecimientos exteriores. El medio ambiente del cerebro incluye el cuerpo, con sus insistencias privadas, y negarlo por salvaguardar los intereses de una representación fiel del mundo exterior es abandonar el núcleo de la regulación. Si no percibimos bien semejante mundo se nos dice que estamos locos; si desatendemos el mundo interior, morimos.

No hace tanto tiempo que se pensaba que la misión de los sistemas sensoriales no era otra cosa que la de proyectar un isomorfo codificado del estímulo sobre la pantalla analizadora e integradora de la corteza cerebral; pero luego hemos destituido el córtex y hemos ascendido el sistema sensorial, permitiéndole una participación mayor en el análisis, de suerte que los datos del estímulo lleguen a los lugares centrales perfectamente clasificados, con todos sus rasgos traducidos al vocabulario de la magnitud, el lugar y el momento.

Más recientemente aún hemos subrayado la capacidad de los sistemas sensoriales de reducir la información, al mantener que no responden a toda peculiaridad de cada uno de los estímulos, sino únicamente a ciertas propiedades comunes a muchos de éstos, de modo que no registraríamos un acontecimiento estimulador cualquiera simplemente en forma de unas verdades acerca de intensidades en unos lugares e instantes determinados, sino en la de afirmaciones y negaciones de unas propiedades complejas, informes quintaesenciados de configuraciones y de secuencias que se acercarían más, por su grado de elaboración, a proto-perceptos que a sensaciones en bruto.

Así pues, los sistemas sensoriales se nos aparecen como algo que desempeña en la decisión, al menos, un papel pasivo: merced a la selección evolutiva de la función de vincular y unificar se han convertido en filtros de lo significativo, que sólo dejan pasar las estructuraciones de estímulos que han resultado tener peso semántico en un mundo de restricciones. Mientras el mundo mantenga unas ranuras de constancias, a las criaturas que se ajusten a tales ranuras les bastará aquella fijada selección de lo significativo.

En lo que se refiere a la visión se han estudiado algunos de los detalles de esta tramitación sensorial previa (LETTVIN *et al.*, 1959; HUBEL y WIESEL, 1959), y los técnicos constructores de máquinas han intentado explotarlos; pero, en sus manos, la extracción de portentosas invariancias, o de propiedades significativas, ha quedado exclusivamente identificada con unas operaciones realizadas sobre unos rasgos objetivos de las configuraciones de estímulos; y si bien esto puede bastar para las tareas de batracio que pedimos a las máquinas, es muy dudoso que este enfoque sea enteramente apropiado para el organismo, cuyo mundo le entra de todas partes, incluyendo su propio interior.

Hoy es evidente que el sistema nervioso no solamente tiene medios de regir el flujo de datos sensoriales, sino que realmente ejerce semejante regimiento; y hay, además, algunos indicios de que éste es sumamente selectivo y no un mero aumentar o atenuar globalmente el flujo en toda una vía sensorial. Pero, cualesquiera que sean la magnitud y calidad de este regimiento retrógrado, las teorías de la tramitación y percepción sensoriales han de tener en cuenta la presencia de la realimentación discriminatoria, cosa que no puede dejarse de lado como un perfeccionamiento tardío; también el insecto (AUTRUM, 1958) y el molusco (YOUNG, 1962) la presentan.

Hace largo tiempo que disponemos de testimonios anatómicos de la existencia de fibras que van a contracorriente de las vías sensoriales aferentes, y que llegan incluso hasta el sitio de unión entre el receptor y la neurona sensorial primaria. Los estudios realizados han mostrado que hay pocos puntos sinápticos —si es que hay alguno— que escapen a la intrusión de las fibras eferentes: pese a que sigue habiendo ambigüedades en cuanto a origen, curso y término, podemos admitir como algo perfectamente asentado la ascendencia estructural del regimiento sensorial eferente.

Los últimos años han presenciado una amplia corroboración fisiológica de tales vías retrógradas, y ahora podemos afirmar con toda confianza la patencia funcional del regimiento eferente. Dado que existen varios panoramas generales del regimiento central (BRAZIER, 1958; LIVINGSTON, 1958 y 1959), no les voy a bosquejar ninguna imagen a grandes trazos, sino a destacar los rasgos que condicen con la percepción como un dinamismo que no solamente está relacionado con las peculiaridades objetivas del estímulo y responde a ellas, sino asimismo con las variables del estado interno, ligadas a la experiencia y a la intención (ya genéticas o aprendidas).

Como podría sospechar quienquiera esté familiarizado con las modas actuales de la neurofisiología, la formación reticular diencéfalo-mesencefálica se encuentra fuertemente involucrada en el regimiento sensorial (HERNÁNDEZ PEÓN, 1955 y 1961; LINDSLEY, 1958); sabemos que los sistemas sensoriales aferentes, además de por su curso clásico, discurren colateralmente a través de la formación reticular. Pero este último recorrido no es necesariamente mediato: se ha comprobado (GALAMBOS *et al.*, 1961) que la sección transversal de la vía auditiva clásica no suprime, en los gatos, la respuesta cortical a la estimulación auditiva, respuesta que sólo se elimina tras una sección efectuada con agentes químicos que sabemos actúan selectivamente sobre la formación reticular. Debe advertirse que esta vía extralemniscal no presenta ningún aumento de latencia marcado con respecto a la lemniscal: la señal no se arrastra por ciénagas multisinápticas.

Estos hallazgos hacen presumir la existencia de una doble vía corticópeta: una, la lemniscal clásica, y otra, aun cuando de curso reticular,

dotada, según se nos aparece, de una especificidad modal que no condice con la proyección difusa de la formación reticular sobre el córtex.

Si la vía aferente es doble podemos, apelando a la simetría, postular asimismo la dualidad para la vía eferente. Y, verdaderamente, existen algunos hechos que apoyan esta división: al estimular el tracto olivo-coclear de gatos anestesiados a los que se hayan seccionado o paralizado los músculos del oído medio, se ha visto que la actividad del nervio auditivo había desaparecido (GALAMBOS, 1956); otras tentativas posteriores del mismo autor (GALAMBOS, 1960) destinadas a observar el mismo efecto en gatos no anestesiados y con los músculos del oído medio intactos no han tenido éxito, aun cuando otros estudiosos (GERSHUNI *et al.*, 1960) sostienen haberlo conseguido. Y se ha hecho notar (GALAMBOS, 1960; GALAMBOS y RUPERT, 1959) que los músculos del oído medio del gato no anestesiado pueden causar una atenuación considerable de la respuesta del nervio auditivo, acción que es esporádica aunque persistente, y que no constituye sin más una respuesta "protectora" frente a sonidos muy fuertes.

Los estudios realizados sobre el sistema visual (FERNÁNDEZ GUARDIOLA *et al.*, 1961) presentan unos paralelos muy sugestivos: cuando se elimina con atropina la movilidad pupilar en los gatos, se reduce o suprime la "habituación" característica de la respuesta fótica en el quiasma óptico (HERNÁNDEZ PEÓN *et al.*, 1956).

Estos estudios auditivos y visuales hacen pensar en una terminación doble de las vías eferentes: una "exterior", en las yunciones efectoras de las aparatos motores insertos entre el estímulo y el receptor, y otra "interior", en las yunciones receptoras y sinápticas del sistema neuronal aferente.

Una vez identificadas tanto una como otra terminaciones se siente la tentación de defender la existencia de una vía eferente doble; puesto que los dos géneros de terminaciones difieren notablemente en cuanto a lo que es esperable de sus respectivos efectos en la entrada sensorial, es —por lo menos— plausible suponer que se encuentran bajo la mediación de unos mecanismos centrales funcionalmente distintos: el terminal exterior es idealmente apto para una modulación basta de la entrada del sistema sensorial que sea, y las terminaciones interiores, que actuarían sobre todas las sinapsis —o la mayoría de ellas— de la vía aferente (incluidas las yunciones receptoras), parecen ser idóneas para conseguir la selectividad dentro de cada modalidad.

Pero no es necesario que pendamos únicamente de plausibilidades; se ha observado (DESMEDT y MECHELSE, 1958) que la estimulación de ciertos puntos diencefálicos distintos de los reticulares puede reducir la respuesta del nervio auditivo; y parejamente existen pruebas de la existencia de un sistema eferente extrarreticular que afectaría a la respuesta del sistema eferente somestésico (CHAMBERS *et al.*, 1960). Resultados que hacen pensar que la formación reticular no se encarga de la totalidad del comercio

sensorial, sino que, en realidad, desempeña un papel bastante tosco en cuanto a la influencia eferente.

Lo cual apoya (DESMEDT, 1960; SPRAGUE *et al.*, 1960) la existencia de un sistema eferente extrarreticular dotado de una elevada capacidad de discriminación. Ahora bien, la introducción de un nuevo sistema eferente no contradice que en los fenómenos de la "atención", la "habituación" y el condicionamiento, tal como los observamos en el interior del sistema nervioso (HERNÁNDEZ PEÓN, 1955, 1960 y 1961), se encuentre involucrada la formación reticular: si se permite la analogía, el sistema reticular actúa protopáticamente en su regimiento de la entrada sensorial, y el "paralemniscal" epicríticamente.

En suma, estoy indicando que hay dos sistemas eferentes que tocan sobre los canales sensoriales de entrada. El sistema reticular eferente, que actúa terminalmente en los aparatos motores auxiliares de cada uno de los sistemas sensitivos, ejerce una reacción tónica y fásica basta, que modula el aflujo sensitivo total y selecciona de entre los diversos sistemas sensoriales, pero con una capacidad de selección dentro de cada modalidad estrictamente limitada. El sistema eferente paralemniscal, por otra parte, que actúa primariamente sobre las yunciones de los receptores y las sinapsis de los sistemas aferentes, tiene a su cargo la realimentación intramodal discriminativa.

Pero la realimentación, ya sea tosca o fina, es un medio, no un fin. ¿A qué finalidad se dirigen estos sistemas eferentes? En el título que he puesto empleo la expresión "homeóstasis sensorial", pero sería arrogante pretender que su referencia es transparente; hablar de homeóstasis es hacerlo del mantenimiento dinámico de unas variables dentro de ciertos límites, frente a las perturbaciones; y aunque estamos bien enterados de las variedades existentes de homeóstasis vegetativa, hemos prestado escasa atención a una regulación análoga por el lado sensorial.

Puedo apuntar diversos tipos de homeóstasis que actuarían en los procesos perceptivos. Tenemos la regulación grosera de la intensidad del estímulo, que involucra en gran medida los aparatos motores accesorios, y asimismo, indudablemente, una atenuación y una amplificación en las vías neurales. Luego están los mecanismos por cuyo medio los circuitos nerviosos que participan en la tarea de filtración de las propiedades se mantienen en los estados que permiten una afluencia constante de informes: se ha comparado la extracción de los invariantes de estimulación a la selección de un subconjunto de todas las configuraciones de estímulos, pero los miembros de tal subconjunto son, a su vez, muy numerosos y variados, y realmente nos podríamos dar por muy afortunados si encontrásemos un mecanismo fijo que enviara informes indiscriminadamente de todos ellos; se conlleva mejor con lo que sabemos de las vías y los medios biológicos la suposición de que los mecanismos para la extracción de invariantes no son, por su parte, invariantes: posiblemente el organis-

mo habrá de *hacer* algo para que dos elementos distinguibles entre sí puedan verse como el mismo.

Hay aún otra forma de homeóstasis, que está relacionada con la habituación. Existen pruebas (KEIDEL *et al.*, 1961) de que el proceso de ésta no es tanto una reducción de la capacidad de respuesta cuanto una sensibilización a las divergencias con respecto al estímulo habituador; por consiguiente, puede que haya un mecanismo homeostático preteridor que garantice la máxima capacidad discriminativa, siempre que el estímulo reiterado o constante se encuentre en el espectro sensorial: así se mantendría constante la capacidad de selección (expresada por el tamaño del conjunto a partir del cual estaría dispuesto el organismo a efectuar una elección) lo mismo si la alerta de éste se dirige a toda una modalidad que si lo hace a una fracción de ella. Y no cabe duda de que un mecanismo semejante entra en acción en el fenómeno general de la competencia entre especificar qué es lo que hay y cuándo lo hay.

Es completamente seguro que en los órganos más elevados de la constancia perceptiva, y en todos los casos en que se mantiene la percepción pese a los cambios experimentados por el estímulo, se encuentra cierta homeóstasis. Los estados internos —las actitudes facilitadoras o anticipadoras del organismo (SPERRY, 1955)— tenderían a mantener la percepción íntegra y definida; y, verdaderamente, es preferible considerar la percepción como la elaboración de *definiciones* del medio que como la formación de *imágenes* de él. Definiciones que habrán de ser operativas, esto es, dadas a base de las respuestas motrices y glandulares apropiadas a ellas: las representaciones internas últimas de los acontecimientos externos son instrucciones para actuar; no pautas de las relaciones objetivas entre los sucesos del medio, sino de los procesos unitarios motores y glandulares elementales o estereotipados que puedan combinarse y obrar de modo que reduzcan la perturbación sufrida por las variables esenciales.

Como cibernetistas, estamos obligados a ver en el cerebro un regulador: a mirar su misión como el enfrentamiento de la variedad interna con la externa; lo cual tiene que expresarse, en último término, mediante reacciones glandulares y motrices sobre el medio. De aquí que sea coherente con este punto de vista el que la representación sensorial se exprese a base de coordinaciones motrices y glandulares (SPERRY, 1952) y el que los mecanismos centrales influyan en la sistematización sensorial de tal modo que nuestra perspectiva del medio se encuentre a merced de cómo estemos dispuestos a componérnoslas con él.

Así pues, hemos cerrado el círculo. La manzana es para comerla, para agarrarla o para lanzarla, y no un compuesto lógico de propiedades desprovistas de compulsión. No vemos para poder conocer el mundo, sino para existir en él; y en un mundo complejo y dinámico, existir es actuar, hacer: somos primero actores y poetas, y sólo luego, y si lo tenemos a bien, científicos.

RECONOCIMIENTO

Trabajo sufragado en parte por el contrato NSFG 17414 de la National Science Foundation.

RESUMEN

Desde hace largo tiempo, las vías eferentes a los órganos receptores periféricos han tenido a su favor, al menos, un testimonio ambiguo, y los últimos años han presenciado cierta exploración de la patencia funcional de semejantes vías. A este respecto podemos distinguir dos clases: 1) la inervación de los aparatos motores accesorios de los sistemas sensoriales, y 2) las fibras eferentes que terminan en las células receptoras mismas o en su proximidad.

En tanto que podemos asignar provisionalmente a la primera clase el papel de atenuar o normalizar la dimensión intensiva del estímulo, no cabe una asignación sencilla de esta índole en lo que se refiere al papel de la segunda clase. Hemos debatido varias posibilidades al respecto y argüido a favor de determinado papel en el fenómeno general de la constancia perceptiva. Exponemos asimismo cierta vinculación entre la función de estos lazos retrógrados y la suposición de un modelamiento interno del mundo.

Sostenemos que el modelo interno no mantiene un homeomorfismo constante con las configuraciones de los estímulos, y que tampoco está enteramente determinado por la experiencia.

Nos hemos ocupado, finalmente, de la utilidad del regimiento sensorial eferente para explotar las restricciones a que estén sometidos los estímulos (o redundancia de la entrada).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AUTRUM, H. (1958): Electrophysiological analysis of the visual systems of insects. *Experimental Cell Research, Suppl. 5,* 426-439.

BRAZIER, M. A. B. (1958): The control of input from sensory receptors by output from the brain. *Proceedings of the First International Congress on Cybernetics.* París, Gauthier-Villars (pp. 857-861).

CHAMBERS, W. W.; LEVITT, M.; CARRERAS, M., y LIU, C. N. (1960): Central determination of sensory processes. *Science, 132,* 1489.

DESMEDT, J. E. (1960): Neurophysiological mechanisms controlling acoustic input. *Neural Mechanisms of the Auditory and Vestibular Systems,* edición de G. L. RASMUSSEN y W. F. WINDLE. Springfield, Illinois, C. C. Thomas (pp. 152-164).

DESMEDT, J. E., y MECHELSE, K. (1958): Suppression of acoustic input by thalamic stimulation. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine, New York, 99,* 772-775.

DESMEDT, J. E., y MECHELSE, K. (1959): Corticofugal projections from temporal lobe in cat and their possible role in acoustic discrimination. *Journal of Physiology, London, 147* 17P.

DESMEDT, J. E., y MONACO, P. (1961): Mode of action of the efferent olivo-cochlear bundle on the inner ear. *Nature, 192,* 1263-1265.

FERNÁNDEZ GUARDIOLA, A.; ROLDÁN, E.; FANJUL, L., y CASTELS, C. (1961): Role of the pupillary mechanism in the process of habituation of the visual pathways. *Journal of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 13,* 564-576.

GALAMBOS, R. (1956): Suppression of auditory nerve activity stimulation of efferent fibers to cochlea. *Journal of Neurophysiology, 19,* 424-437.

GALAMBOS, R. (1960): Studies of the auditory system with implanted electrodes. *Neural Mechanisms of the Auditory and Vestibular Systems.* Edición de G. L. RASMUSSEN y W. F. WINDLE. Springfield, Illinois, C. C. Thomas (pp. 137-151).

GALAMBOS, R., MYERS, R. E., y SHEATZ, G. C. (1961): Extralemniscal activation of auditory cortex in cats. *American Journal of Physiology, 200,* 23-28.

GALAMBOS, R., y RUPERT, A. (1959): Action of the middle ear muscles in normal cats. *Journal of the Acoustical Society of America, 31,* 349-355.

GERSHUNI, G. V. (1959): Central regulation of discharges in the periferal neuron of the auditory system. *Sechenov Journal of Physiology, URSS, 45,* No. 7, 24.

GERSHUNI, G. V.; KOZHEVNIKOV, V. A.; MARUSEVA, A. M.; AVAKYAN, R. V.; RADIONOVA, E. A.; ALTMAN, J. A., y SOROKO, V. I. (1960): Modifications in electrical responses of the auditory system in different states of higher nervous activity. *Journal of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Supp. 13,* 115-124.

HERNÁNDEZ PEÓN, R. (1955): Central mechanisms controlling conduction along central sensory pathways. *Acta neurologica latino-americana, 1,* 256-264.

HERNÁNDEZ PEÓN, R. (1961): Reticular mechanisms of sensory control. *Sensory Communication,* ed. de W. A. ROSENBLITH. Nueva York, M. I. T. Press y John Wiley and Sons (pp. 497-520).

HERNÁNDEZ PEÓN, R., GUZMÁN FLORES, C.; ALCARAZ, M., y FERNÁNDEZ GUARDIOLA, A. (1956): Photic potentials in the visual pathway during «attention» and photic «habituation». *Proceedings of the Federation of American Societies for Experimental Biology,* 15, 91-92.

HERNÁNDEZ PEÓN, R., y SCHERRER, H. (1955): «Habituation» to acoustic stimuli in cochlear nucleus. *Proceedings of Federation of American Societies for Experimental Biology, 14,* 71.

HUBEL, D. H., y WIESEL, T. N. (1959): Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology, London, 148,* 574.

KEIDEL, W. D., KEIDEL, U. O., y WIGAND, M. E. (1961): Adaptation: loss or gain of sensory information? *Sensory Communication,* ed. de W. A. ROSENBLITH. Nueva York, M. I. T. Press y John Wiley and Sons (pp. 319-338).

LETTVIN, J. Y., MATURANA, H. R.; MCCULLOCH, W. S., y PITTS, W. H. (1959): What the frog's eye tells the frog's brain. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 47,* 1940-1951.

LINDSLEY, D. B. (1958): The reticular system and perceptual discrimination. *Reticular Formation of the Brain,* ed. de H. H. JASPER *et al.*, Boston, Little, Brown, and Co. (pp. 513-534).

LIVINGSTON, R. B. (1958): Central control of afferent activity. *Reticular Formation of the Brain*, ed. de H. H. JASPER *et al.* Boston, Little, Brown, and Co. (páginas 177-185).

LIVINGSTON, R. B. (1959): Central control of receptors and sensory transmission systems. *Handbook of Physiology, Sec. 1: Neuro-Physiology, Vol. I*, ed. de H. W. MAGOUN. Baltimore, Williams and Wilkins (pp. 741-760).

SPERRY, R. W. (1952): Neurology and the mind-brain problem. *American Scientist, 40*, 291-312.

SPERRY, R. W. (1955): On the neural basis of the conditioned response. *British Journal of Animal Behaviour, 3*, 41.

SPRAGUE, J. M.; STELLAR, E., y CHAMBERS, W. W. (1960): Neurological basis of behavior in the cat. *Science, 132*, 1498.

YOUNG, J. Z. (1962): The retina of cephalopods and its degeneration after optic nerve section: the optic lobes of *Octopus vulgaris*. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, B, 245*, 1-58.

DISCUSION

WELLS.—¿Qué pruebas hay realmente de la existencia de esas inervaciones eferentes de los receptores?

ZOPF.—Aunque tenemos testimonios empíricos bastantes de la inervación eferente de los núcleos sensoriales, las pruebas en favor de la inervación de los receptores mismos son más salteadas: hay testimonios anatómicos de fiar en cuanto a los husos musculares y las células ciliares de la cóclea, pero para los receptores visuales contamos con menos testimonios fisiológicos fiables. Lo importante de señalar es que existe una conexión eferente a las partes situadas corriente arriba de los sistemas sensoriales, y el que termine o no en receptores de todas las modalidades es cuestión que no nos afecta: una entrada eferente a las células bipolares o ganglionares de la retina puede ser tan eficaz —por diferente que sea su acción— como una entrada directa a los bastoncillos o a los conos.

Me parece que no hay por qué tener dudas de la existencia de fibras eferentes a todos los sistemas sensoriales y de que son funcionales.

MCCULLOCH.—Hay solamente una excepción: el sistema olfativo. Lo hemos estudiado bastante a fondo y no hemos encontrado prueba alguna de ninguna conexión eferente.

ZOPF.—Sin embargo, HAGBARTH y KERR han señalado que existe una influencia central sobre la actividad del bulbo olfatorio.

DROOGLEVER FORTUYN.—¿Qué pruebas hay de la importancia funcional de las fibras eferentes que van a los órganos sensoriales? ¿Son modificaciones del umbral, de la función del ojo o del retinograma lo que se produce bajo la influencia de la estimulación cen-

tral? Dudo mucho que exista semejante sistema en el ojo del mamífero.

ZOPF.—No puedo decir nada acerca de la patencia funcional de tal sistema en el ojo del mamífero. Yo me atrevería a sugerir que la presencia de la inervación eferente podría modular —o incluso determinar— la entrada sensorial merced a afectar la sensibilidad del receptor y alterar las señales codificadas, así como el umbral, los potenciales continuos, etc., de las neuronas sensoriales secundarias y superiores; y funcionalmente yo identificaría los sistemas eferentes con la atención, la adaptación, la habituación y hasta la discriminación. Según he propuesto en mi comunicación, el regimiento eferente puede tener una función vegetativa sencilla, homeostática: la de mantener constante el funcionamiento del aparato sensorial neural periférico, por encima de las veleidades de ciertas dimensiones del estímulo. Puede no hacer otra cosa que imponer un "límite de banda" a la frecuencia de los impulsos, por ejemplo, o bien puede tener la función, más importante, de "reajustar" el aparato periférico, anticipándose a configuraciones o rasgos particulares de los estímulos.

MCCULLOCH.—En el caso del ratón y de la rata, la realimentación que va del cerebro al ojo es tan rápida en su cambio de la receptividad de éste, que no hemos sido capaces de resolverla más: el ratón está ahí quieto simplemente, y se obtienen respuestas o no del ojo, según le interese la cosa o no.

ZOPF.—Dicho de otro modo, los ratones pueden cerrarse la mollera, igual que los hombres.

GOLDACRE.—¿Es posible que la base física del "prestar atención" sea la inhibición que está usted sosteniendo de las vías eferentes sobre los órganos sensoriales?

ZOPF.—Lo que he sostenido es que el papel que la formación reticular desempeña en la atención es justamente una supresión selectiva de toda la entrada sensorial, salvo aquella a que se esté atendiendo; pero también podría dar origen a una activación difusa o selectiva de otras estructuras más centrales, tales como el córtex sensorial.

Información sensorial e información conceptual en la actividad bioeléctrica del cerebro

Por ERNEST HUANT

I. PERSPECTIVA GENERAL DE LA INFORMACION NEUROSENSORIAL

A. *Información y diferenciación de los receptores*

En la ciencia de los mecanismos es frecuente que la información no involucre más que un solo modo de variación de la energía, y, además, una variación muy pequeña de la energía de ejecución —e incluso de la energía total, llamada de alimentación— de la máquina: las variaciones de energía luminosa ("tortugas" electrónicas), corpuscular (sistemas electrónicos en general), ondulatoria y, de una forma global, todas las modalidades de la energía de mando son, en general, mucho más débiles que la energía de ejecución.

En biología, y muy particularmente en neurofisiología, esta enorme discrepancia de valores energéticos es una regla prácticamente general, por lo menos para los neurorreceptores en cuanto tales (y tanto más cuanto más diferenciados estén). La "cantidad de información" resulta ser, en biología, apreciablemente más importante que en los sistemas mecánicos a igualdad de energía de mando, y hasta más importante que en ellos, con una energía de mando mucho menor. Toda la fisiología de las sensaciones, en especial, prueba este hecho, sin que casi haya necesidad de comentarlo con ejemplos concretos; bastará que recordemos cuál puede ser, en relación con la energía muscular liberada en la locomoción o en un acto cualquiera de la motricidad voluntaria, la que corresponde a los "feedbacks" [realimentaciones *o* retroacciones] que vuelven de los sentidos propioceptivos, por los cordones ascendentes de la medula, hasta las células del cerebelo: con esto se comprenderá cuál es la intensidad de tal diferencia y se podrá juzgar, a la vez, acerca de su perfecta correspondencia con la elevadísima diferenciación de las conexiones neuronales entre la periferia sensitiva y la medula y entre ésta y los centros superiores.

Lo mismo ocurre en todos los dominios neurofisiológicos. Una diferencia verdaderamente mínima de concentración iónica al nivel de una yunción sináptica neuro-neural o neuro-muscular, o incluso en la corriente humoral que afecte a una [glándula] endocrina, aportará al cerebro, al

bíceps o a la glándula suprarrenal la información que servirá para mandar la perfectamente medible amplificación energética que hará, por fin, que movamos el brazo o que se nos aceleren los latidos cardíacos. Sabemos, por otra parte, que las reacciones de *desplazamiento del equilibrio,* a las que se aplican las leyes de Le Châtelier y Van't Hoff y la de Goldberg y Waage sobre la acción de masas, dan origen a una "tendencia" inversa (esto es, hacia el reestablecimiento del equilibrio), que puede continuar por sí misma la transmisión de una información biológica; ahora bien, estas tendencias no ponen en juego más que cantidades ínfimas de energía electro-iónica. Y lo mismo acontece con todos los fenómenos biológicos cuando entran en juego reacciones reversibles.

Este carácter de la información biológica (con respecto a la de los mecanismos), que posee una densidad extrema desde el punto de vista del valor propio y se encuentra enormemente suelta desde el de la relación energética, tiene que aparecer como función directa de la diferenciación de unos y otros sistemas. O, más bien, tal característica de la información biológica confirma de modo muy preciso lo que los cibernetistas habían observado ya únicamente desde el punto de vista de los mecanismos, a saber: que *la cantidad de información es función directa del grado de diferenciación;* y el punto de vista neurofisiológico nos permitirá añadir lo siguiente: *su energía de transferencia es función inversa de esta diferenciación.*

Cuando se reúnen los elementos de esta doble caracterización de la información biológica parece que llegamos a un resultado eminentemente paradójico. Físicamente presenta incluso una apariencia contradictoria, y parece que lo que debería imponerse es la conclusión contraria —que la cantidad de información fuese función directa de la cantidad de energía de transferencia.

Esto hace ver perfectamente que la noción de información tiene que ser algo más que una noción estrictamente energética, y en este punto es donde la neurofisiología puede devolver a la cibernética los servicios que ésta le ha prestado. "Un mensaje —nos dice WIENER— es una sucesión continua o discontinua de acontecimientos mensurables distribuidos en el tiempo"; pero la cantidad de información que corresponde a un mensaje tiene que depender de una noción que casi podríamos llamar *"cualitativa"*, unida directamente al grado de diferenciación del receptor, es decir, a sus posibilidades de dejarse afectar por esta o aquella partes del mensaje, pues no hay ninguna razón por la cual éste tuviese que ser siempre absolutamente simple (e incluso, aunque lo fuese, podría imprimir su información, mediante un proceso uniforme, sobre un receptor polivalente). Así pues, tal información quedará multiplicada cuantitativamente por las posibilidades de ejecución —casi le gustaría a uno decir por la superficie sensible— del receptor. Pero hay algo más: en biología es muy raro que el origen de la información sea uniforme; lo es, y con gran frecuencia, en la

primera fase de las etapas de su recorrido, por ejemplo, en la impresión directa de cierta energía exterior sobre un receptor sensorial (retina, tímpano...), pero inmediatamente se difunde a través de unos verdaderos transformadores neuro-sensoriales (células de Corti para el oído, red simpática terminal para las glándulas, etc.); y en cada uno de estos difusores la energía informadora adopta, sobre las modalidades energéticas nuevas —ya sean más débiles o más fuertes— que puedan sumarse a la modalidad primitiva, otros valores provinentes del difusor mismo. De este modo hay una serie de propiedades nuevas que pasan sucesivamente a enriquecer la cantidad de información, *incluso si la transferencia energética disminuye todavía más.*

Así pues, y siguiendo una correspondencia que hemos encontrado ya a menudo en otros estudios, parece ser que en esta noción de la información el hecho biológico presenta particularidades que se deben a su misma organización. Y ello ocurre en particular porque, a nuestro entender, eleva al nivel de los sistemas a gran escala ciertas propiedades latentes de la naturaleza real que el físico no puede presentir sino al nivel de los sistemas infra-atómicos: realiza plenamente y demuestra, en virtud de múltiples realizaciones constantemente renovadas, un hecho que la físico-matemática de los mecanismos hacía ya presumir, pero que la biología ilustra con múltiples ejemplos y refuerza, así, con una efectiva autoridad; a saber, que la información puede ser algo más que una variación energética, y que la "cantidad de información" supone, además, una verdadera *transferencia de propiedades.*

B. Alternancias energéticas, separaciones cronológicas y transferencia de propiedades

Esta noción de la transferencia de propiedades conceptuales es, *a priori,* bastante oscura (y hasta muy oscura), y hemos intentado analizarla en un estudio de las estructuras intelectuales de la realidad, del cual nos parece útil recordar aquí algunos elementos. El análisis de la física matemática nos lleva a descomponer las cosas en moléculas y átomos, y luego en partículas —electrones, fotones— que ya no son, por su parte, sino puntos de fuerza, tipos de abstracciones, soporte de la acción; de modo que, finalmente, y más allá del cuanto de acción, cuyo choque —el impacto— constituye el fenómeno observable al que tienden a reducirse todos los demás, el mundo parece expresarse por un sistema extremadamente complicado de ecuaciones: por un conjunto conceptual de estructura matemática. Podemos, entonces, plantear la cuestión de saber cómo se puede efectuar el paso de este conjunto a las modalidades registrables y medibles y a las percepciones que constituyen para nosotros lo que llamamos corrientemente la realidad.

Hemos creído posible considerar cómo la acción, mirada como con-

cepto global, puede identificarse, a todo lo largo de sus modalidades de transformación, con el transporte de unas propiedades matemáticas, ligadas a unos constituyentes puramente ondulatorios (pero de los que asimismo pueden diferir). Hemos mostrado que esta noción de reparto de propiedades a lo largo de un movimiento o de una energía puede adoptar un sentido único desde el punto de vista conceptual y acabar por enlazarse con uno y otra, principalmente a través de una idea del tiempo; y cómo, en particular, podía tomar un sentido conceptual comprensible el reparto de propiedades elementales a lo largo de un nivel energético dado, *merced a ampliar la noción de energía* en un concepto probabilístico que corresponda a la *reunión de todos los estados posibles en torno a un estado cierto.* En todo caso, la idea de estructuras intelectuales es inseparable del concepto global de la acción, único capaz de soportar la noción de movimiento, de cambio y, por consiguiente, de temporalidad.

De esta manera puede resultar que la acción, independientemente de su valor propio y de toda modalidad de transformaciones a través de efectores especializados (como los receptores neuro-sensoriales de los seres vivos), puede ser mensajera de retrasos cronológicos que unan, al valor de velocidades inferiores o iguales a las de la luz, el valor de los tiempos locales e incluso la velocidad de propagación de éstos.

Pero es preciso percatarse aquí de que, a través de los efectores y receptores sumamente especializados de los aparatos del neuropsiquismo humano, la información inherente a la acción propiamente dicha *se enriquece y desarrolla* por una verdadera *confrontación,* una verdadera *relación* entre la acción eferente misma y las diversas modalidades de transformación que desencadene a través de tales aparatos. El elemento biológico de los centros cerebrales es en sí mismo, por encima de todos los demás, un operador (esto es, un modificador de acontecimientos), y se presta de un modo especial a recibir y emitir las sucesiones de alternativas que, según afirma la teoría matemática de la información, son la mejor manera de transportar un mensaje. Por ejemplo, parece muy probable que, en lo más profundo de su organización, en la máxima finura de su disección microhistológica y microquímica, *el ser vivo sea sensible a la discontinuidad cuántica* que, como demuestra la física matemática, es el substrato de la naturaleza real; y, según ya hemos visto y volveremos a ver más adelante, es asimismo sensible a retrasos cronológicos de orden extremadamente diminuto.

Pensemos, por ejemplo, que la percepción visual del relieve de los objetos depende esencialmente, en último análisis, de la separación cronológica entre los fotones emitidos por las partes del objeto más cercanas y las más alejadas de nuestra retina, cuyo orden es de unos milímetros o centímetros divididos por 3.10^{10} o por 3.10^{9} [respectivamente].

Estas separaciones y tal discontinuidad realizan, sin duda alguna, los dos medios principales por los que la naturaleza real lanza sus alternati-

vas fundamentales, que pueden resumirse, en su conjunto, en esta [doble] posibilidad: presencia de cierta cantidad de elementos de acción en un instante determinado; ausencia de cierta cantidad de elementos de acción en un intervalo dado de tiempo local.

Es posible, por lo tanto, apoyándose en estos datos generales, trazar un esquema general de la distribución tempóreo-espacial de la información al nivel de los centros cerebrales, llevando en ordenadas el valor, ΔQ_1, de la cantidad de acción informativa que se ejerza tras un intervalo cronológico libre, Δt_1, con respecto a la que la precediese en el instante t; luego, un nuevo valor de la energía informativa, ΔQ_2, que se ejerza una vez transcurrido el intervalo libre Δt_2 (que se añada al tiempo Δt_1); después, ΔQ_3, para el intervalo libre Δt_3 (que se añadiría al tiempo $t + \Delta t_1 + \Delta t_2$); a continuación, ΔQ_4, para el intervalo libre Δt_4, etc. De este modo se obtiene, en el plano de los ejes de referencia,, no una curva, sino un

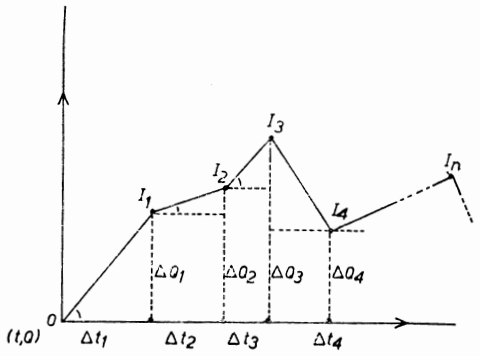


Fig. 1. Esquema representativo de la distribución tempóreo-espacial de la información para la sucesión $\frac{\Delta Q_n}{\Delta t_n}$. —

sistema de puntos aislados I_1, I_2, I_3, etc. (fig. 1). Sin embargo, nos parece legítimo considerar que el valor global de la información en el punto I_n es función directa de la relación

$$\frac{\Delta Q_n - \Delta Q_{n-1}}{\Delta t_n}$$

lo cual equivale a decir que si se unen por medio de rectas los puntos I_1, I_2, ... I_n, los valores globales sucesivos de la información pueden representarse en función de las tangentes trigonométricas de [los ángulos que formen] los segmentos I_1, I_2, I_3, etc., con el eje de los tiempos.

Una representación gráfica de esta índole permite darse cuenta inmediatamente de que, incluso para un valor pequeño de ΔQ, la información puede ser muy grande si Δt es suficientemente pequeño, y de que, aun

cuando ΔQ posea un valor elevado, la información puede ser pobre si Δt es suficientemente grande. Tenemos un interesante caso particular límite —si bien teórico— cuando se trata de una sucesión de los mismos valores energéticos separados por intervalos cronológicos iguales: la representación gráfica que hemos propuesto arriba se convierte en la de una recta, $I_1 I_2 I_3 \ldots$, paralela al eje de los tiempos, y no existe, en realidad, verdadera información fuera de la del primer elemento secuencial, $\Delta Q/\Delta t \ldots$, que no hace sino repetirse idéntico a sí mismo, pues las informaciones

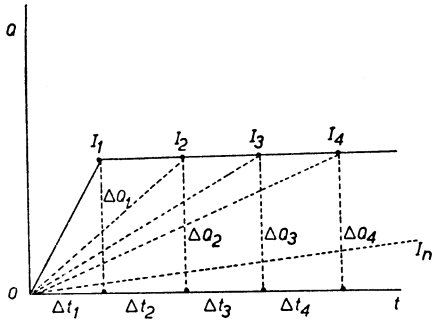


Fig. 2. Caso particular en el que los mismos elementos secuenciales se encuentran separados por los mismos intervalos cronológicos: $I_n \longrightarrow 0$.

consecutivas son nulas (fig. 2). Es posible cerciorarse, además, de que incluso la primera información acaba por perder su carácter informativo a medida que se repite: el punto I_1 puede reemplazarse en la sucesión cronológica por los puntos I_2, I_3, ... I_n, de modo que la recta OI tiende a una posición paralela al eje de los tiempos, y, por consiguiente, hacia una tangente de valor cero.

II. LA INFORMACION SENSORIAL Y LAS REACCIONES DE DETENCION DE LAS ONDAS CEREBRALES

Hay algo que demuestra todavía mejor el papel de la transferencia de propiedades que hemos analizado más arriba: es su concordancia perfecta con determinados hechos revelados por el estudio de las ondas cerebrales en relación con la fisiología de la sensación, en especial con la percepción visual.

Ya desde sus primeras investigaciones, BERGER había advertido un fenómeno de importancia capital, que ha servido posteriormente a los técnicos de la cibernética para comprender mejor la necesidad de los tiempos de desconexión de las máquinas de calcular electrónicas: se trata de la *reacción de detención* [*arrêt*], esto es, de la supresión temporal de las ondas α —ritmo fundamental de la actividad eléctrica del cerebro—

bajo la influencia de la excitación visual (si bien tanto otras sensaciones como incluso el esfuerzo intelectual del interés y la atención pueden provocar la reacción de detención). Una cosa extremadamente interesante, y que corrobora de un modo muy preciso la importancia de la transferencia de propiedades que acabamos de estudiar, es que lo que da lugar a esta acción suspensiva no es un haz luminoso homogéneo, sino justamente un campo heterogóneo; así pues, de lo que se trata no es de la percepción de la luz, sino precisamente de la de las formas y los objetos. El sujeto puede permanecer con los ojos bien abiertos en un campo visual iluminado de manera uniforme: no se producirá ninguna modificación clara del ritmo α (LOOMIS, HARVEY y HOBART lo han demostrado de una manera muy sencilla haciendo mirar a un sujeto una hoja de papel blanco y un reloj: el ritmo no desaparece más que a la vista del reloj). De modo que la información de la percepción visual es, en definitiva y ante todo, una información sobre relaciones matemáticas, sobre propiedades de estructura; y al mismo tiempo podemos encontrar en estos hechos una confirmación de nuestro esquema representativo de la percepción antes propuesto.

La cosa es todavía más curiosa si se admite, según JASPER, CRUIKSHANK y HOWARD parecen haber demostrado, que el esfuerzo por percibir puede tener el mismo resultado que la percepción de un haz heterogéneo: un sujeto que trate de percibir en la oscuridad no una mancha luminosa cualquiera, sino este o aquel objeto, desencadena la reacción de detención. Parece, pues, que es sobre todo el esfuerzo intelectual, *the attempt to see* (como escriben LOOMIS, HARVEY y HOBART) lo que constituye en este caso el elemento fundamental del tiempo de detención; mas este esfuerzo por ver, y por ver algo, corresponde igualmente a una información (desencadenada por la memoria), juntamente con la voluntad de dirigirse. Vemos aparecer así, por primera vez en esta exposición, esta noción, cuyo interés es tal que es innecesario subrayar que, desde el punto de vista de la información biológica, *un concepto puede ser equivalente a una sensación* y puede producir por sí mismo influjos análogos a los que transportan la información sensorial; lo cual tiene una enorme importancia para explicar determinados comportamientos humanos, que exceden la lógica cibernética estricta.

En efecto, el papel de los factores psíquicos sobre la actividad eléctrica del cerebro se encuentra con igual facilidad en el animal que en el hombre. Así, ya en 1936, ECTORS, que realizaba experimentos con conejos, escribía que para producir la modificación característica de los potenciales de acción "no basta aplicar una estimulación sensorial: es preciso que el animal se encuentre en un estado de receptividad, delatado por reacciones expresivas"; y más adelante: "Una observación atenta del conejo en el momento en que se le presentaba un objeto para que lo oliese permitía saber, con toda seguridad, si habría o no modificación de los

potenciales corticales. Pues cada vez que el animal olfateaba las ondas α se atenuaban o desaparecían, y cada vez que no lo hacía se encontraban ondas α de amplitud normal." Aún más: si, repitiendo un experimento de ECTORS, se pincha con una aguja la pata delantera del conejo, la sensación dolorosa determina sobre los potenciales corticales (recogidos al nivel del centro de la masticación) la supresión de las ondas α, y, juntamente —como suele ocurrir en este tipo de experimentos—, una amplificación de las ondas β (tras de lo cual reaparecen las α): se trata de la reacción característica a la información aportada por el circuito sensitivo. Pero si inmediatamente después de este primer experimento se acerca la aguja a la pata del animal, aunque sin tocarla, éste manifiesta la reacción exterior emotiva del miedo, y esta reacción únicamente psicofisiológica determina, asimismo, la reacción de detención: supresión de las ondas α (sin que en este caso se produzca, en cambio, la amplificación de las β). También aquí la información ha sido el transporte de una reacción psíquica, y no solamente de una sensación. En el gato, el estado de excitación, o simplemente el de *alertness* (es decir, de espera o de aprensión), conducen igualmente a suprimir el ritmo lento cortical (experimentos de RHEINBERGER y JASPER).

Hay algo muy notable y que confirma nuestro segundo esquema de reparto de la información cerebral: la repetición de idéntica excitación lleva al animal a un estado de habituación o acostumbramiento que termina por dar origen a modificaciones cada vez menos claras de la actividad rítmica; y ésta llega, finalmente, a ser insensible. En términos cibernéticos podría decirse que la información que reproduce continuamente el mismo mensaje tiende a perder, con ello, su valor informativo: no presenta ya discontinuidad real (puesto que repite constantemente los mismos elementos) y pierde, a la vez, sus secuencias de alternativas (ya que la alternativa queda reemplazada por una sucesión de motivos idénticos).

Se pueden comparar estos hechos de indiferencia de las ondas α, en el hombre, a un haz luminoso homogéneo; por el contrario, si —incluso sin objetos ni formas algunos— se corta o se abre bruscamente tal haz, se obtiene de nuevo la supresión del ritmo fundamental. Puede comprobarse la supresión de las ondas α en un sujeto (experimentos de ADRIAN y MATTHEWS) al que se le pida que haga un esfuerzo por ver, conservando los ojos cerrados. En los dos primeros casos la variación brusca del haz, el esfuerzo intelectual en el tercero, han sido causa de una información que ha producido el mismo efecto inhibidor sobre la actividad eléctrica rítmica de la corteza cerebral.

Las sensaciones táctiles y auditivas —al menos las breves e interrumpidas— producen en los electroencefalogramas, en general, reacciones de detención análogas al efecto de los estímulos visuales. Pero mucho más interesantes aún son los efectos de una coexistencia de estímulos: DURUP y FESSARD han demostrado que la supresión de las ondas α provocada por

una recepción visual puede quedar anulada, o incluso reemplazada, por un aumento de la amplitud del ritmo, gracias a un estímulo auditivo simultáneo (por ejemplo, un ruido periódico).

La noción de *habituación* o *acostumbramiento* no pierde nada de su importancia en las reacciones de la actividad eléctrica del cerebro a estímulos auditivos continuos (canción monótona) que no alteren el ritmo α, y que incluso lo hagan aumentar de amplitud. Igualmente ocurre, según ADRIAN, MATTHEWS y DELAY, con el trabajo mental regular, que no provoca más que una ligera disminución de la amplitud de las ondas α, y en ciertas ocasiones ni aún las altera en absoluto. Por el contrario, las variaciones bruscas de los estímulos —preguntas propuestas de improviso, una decisión que haya de tomarse súbitamente— originan la reacción de detención. Todos estos hechos muestran con claridad el importante papel de los factores psicoemotivos en la información neurosensorial.

Los neuropsicólogos que se han dedicado al estudio de los electroencefalogramas han determinado que la reacción de detención se produce después de un tiempo de latencia variable, de acuerdo con los estímulos sensoriales, y que se sitúa entre 0,09 y 0,70 seg. Las excitaciones visuales son las que conllevan un tiempo de latencia más reducido; e incluso existe una *relación logarítmica* entre este tiempo y la intensidad de una iluminación brusca de una duración determinada (de 0,1 a 0,2 seg): si se da un valor constante al producto de la intensidad por la duración se encuentra un tiempo de latencia constante. Se llama, por fin, *tiempo de adaptación* al tiempo necesario para que aparezca la habituación, esto es, la reaparición de la amplitud normal de las ondas α en presencia de estímulos repetidos.

El estudio de la actividad eléctrica espontánea del cerebro y de las modificaciones rítmicas subsiguientes a los estímulos sensoriales ha conducido a los neurofisiólogos a interesantes conclusiones sobre la topografía bioeléctrica del cerebro y, sobre todo, sobre la interpretación de ciertos desórdenes patológicos. Se ha comprobado, por ejemplo, que las excitaciones visuales obraban selectivamente sobre las ondas occipitales, y que las táctiles lo hacían sobre las ondas precentrales; lo cual es un elemento capital para situar la proyección de las áreas sensoriales al nivel del córtex. Desde el punto de vista patológico, recordaremos —por mantenernos dentro de los confines de nuestro tema— la posible existencia de un ritmo α normal en los ciegos (es decir, en ausencia de todo estímulo vistual) y, por encima de todo, el hecho de que las alucinaciones visuales determinen zonas de silencio de este ritmo; lo cual tiene una importancia especial, pues, colocándonos en el punto de vista cibernético, hemos de decir que la información procede aquí de un proceso cerebral, sin estímulos visuales directos exteriores, y únicamente por una perturbación del quimismo interno de cierta capa de la corteza.

En este caso, la información no está ligada a ningún transporte ener-

gético que sirva de soporte a unas propiedades estructurales ni es relativa a ningún proceso psíquico ni concepto: proviene del medio humoral intoxicado (alucinaciones mescalínicas) o, en el caso de la sugestión hipnótica, de un "orden" percibido directamente por el psiquismo. Se puede suponer, tanto en un caso como en el otro, que pone en juego propiedades estructurales o colorimétricas conservadas por la memoria; mas lo extraordinario es que, en esencia, se comporta exactamente lo mismo que la información procedente de los estímulos energéticos, y que parece exigir asimismo, para ser "recibida", la supresión —o, al menos, una disminución— de la actividad rítmica espontánea.

Así pues, estas alteraciones patológicas confirman la unidad profunda que parece vincular la información sensorial a la provinente de un concepto, y hacen ver que, lo mismo en uno que en otro caso, las transferencias aferentes de energía a los centros son ciertamente testigos, si no portadores, de un complejo de propiedades. Y percibimos aquí una característica esencial que es capaz de afectar, por lo menos en sus formas más elevadas, la información biológica: *el concepto es capaz de "informarse" en una transferencia energética.*

Hemos intentado personalmente completar estos datos mediante una serie de experimentos derivados de nuestro método de investigación basado en las pruebas de medida de la acuidad de la percepción temporal y de los intervalos de asimultaneidad de las percepciones sensoriales, que nos sirve para apreciar la acción de ciertas sustancias sobre el tono neurorrítmico de diversos estados patológicos, entre ellos los de la senectud. Hemos utilizado, pues, el método de muestras luminosas con sujetos sometidos a electroencefalografía, con las técnicas habituales, y hemos podido advertir los resultados que siguen.

La muestra estaba constituida por una cruz de Malta iluminada con luz roja; vemos primero en el electroencefalograma la disminución prevista del ritmo α.

Después de que este ritmo vuelve a ser normal se hace reaparecer la cruz roja y se dice al sujeto: "¿Es verde esa cruz?... Es verde, ¿no es así?" Los resultados de los neurogramas muestran siempre perturbaciones, pero no siempre en el mismo sentido; y a este respecto hemos podido clasificar a los enfermos en dos categorías.

a) Por una parte, los sujetos con el psiquismo bien equilibrado muestran en este ensayo una disminución más clara, rápida y duradera del ritmo α en el 74 % de los casos, una disminución menor en un 17 % y una indiferencia de tal ritmo —incluso con cierta tendencia a acentuarse— en el 9 % de los casos (número total de sujetos, 46).

b) Por otra, en los sujetos fatigados, senescentes o niños mayores inestables, el resultado se presenta en orden inverso: los casos de disminución menor —o sea, en los que la reacción de detención es menos apre-

ciable— aventajan a los de reacción más fuerte: son el 65 % frente al 35 % (número total de sujetos, 52).

Se pueden interpretar estos resultados, a la luz de los datos precedentes, considerando que el color que hemos sugerido ha desencadenado una información que se superpone en el mismo sentido a la sucesión de alternativas de la información sensorial que se deriva del color percibido, ... con lo que acentúa el valor de ésta y, partiendo de este hecho, aumenta la intensidad de la reacción de detención. Y el que observemos que este hecho se produce sobre todo con los sujetos en calma y estables (que en el ensayo de la "pregunta contradictoria" reestablecen en seguida la situación real, y para los cuales, por el contrario, la sugerencia del color falso no parece servir más que para hacer que destaquen aún más los contornos del color verdadero y, por tanto, para amplificar la información total procedente de éste) es completamente normal... Como la intensidad de la muestra roja no ha variado, es preciso admitir que la información conceptual se ha traducido en un incremento de las cargas energéticas en ciertas etapas [*relais*] del circuito informativo; etapas que son, evidentemente, internas, van, según es verosímil, de un centro neuroperceptivo a otro y han de poner en juego, en unos trayectos, fenómenos de ***inhibición,*** de ***"facilitación"*** en otros.

En cuanto a la segunda categoría de hechos observados, que se presenta, especialmente, en el caso de sujetos asténicos, senescentes o inestables y conduce a un número más elevado de reacciones de detención menos características y menos caracterizadas que en la primera fase del experimento, creemos que es posible ponerla en relación con lo que habíamos dicho en otros trabajos anteriores, a saber: con la derivación preferente del influjo. Se trata del fenómeno que se observa cuando se hace que actúen simultáneamente dos estímulos sensoriales, auditivo y visual, por ejemplo: se observa entonces una disminución mucho menor de las ondas α, y a veces cabe advertir hasta un aumento de su amplitud. Ello resulta de una *interacción negativa* de uno u otro de los estímulos (en el caso que ahora nos ocupa, del auditivo sobre el visual), que disminuye la amplitud de la retroacción de equilibrio entre la energía bioeléctrica del cerebro y el influjo informador. (Más adelante volveremos sobre este punto.)

Pero, en lo que se refiere a la interpretación de la serie experimental que estamos examinando, haremos notar que el estado psíquico peculiar de los sujetos de este grupo hace que el concepto coloreado, afirmado y sugerido parezca imponerse desde el córtex a los centros neuroperceptivos como una información conceptual que predominaría sobre la sensorial. Así pues, no hay *equivalencia de los dos estímulos simultáneos:* el sujeto piensa "verde" mucho más que tiene conciencia de percibir lo rojo. Entre el uno y el otro de estos dos circuitos informativos ya no hay suma y yuxtaposición, como en el primer caso, sino derivación preferente del

influjo, que ya no hace necesaria la disminución de las ondas α, y puede incluso permitir que aumenten de amplitud.

Hemos vuelto a efectuar más experimentos del mismo tipo, esta vez con respecto a la información auditiva, haciendo que el sujeto a quien se tomaba el electroencefalograma oyese un fragmento ejecutado al piano y proponiéndole la pregunta: "Está oyendo usted un violín; ¿es un violín, verdad?" (el instrumento estaba oculto en una habitación próxima). Las respuestas han sido, globalmente, del mismo tipo que con el experimento de las muestras luminosas y se refieren a las mismas categorías de sujetos; sin embargo, la inversión de la reacción de detención en el grupo de los sujetos fatigados ha sido menos sensible: el 52 % de los casos.

Cuando se adopta el punto de vista cibernético de las retroacciones e interacciones es posible dar una explicación fácil y lógica del juego de las estimulaciones sensoriales sobre los ritmos biológicos espontáneos del cerebro.

Así, considerando como un *efector* los centros corticales afectados por los estímulos y la información sensorial como un *factor causal,* la disminución de las ondas α se convierte en un *efecto.* Es lógico formular la hipótesis consistente en admitir que la disminución de energía α corresponde a la necesidad de contrarrestar, de anular, una parte de la energía sensorial concomitante con la información: es como si hiciese falta cierto estado de reposo, o de potencial bioeléctrico mínimo, para que el cerebro sea sensible a la energía informadora y para permitirle extraer sus propiedades estructurales. Es evidente que no se trata, con esto, más que de una hipótesis, pero que —repitámoslo— es sumamente verosímil, teniendo

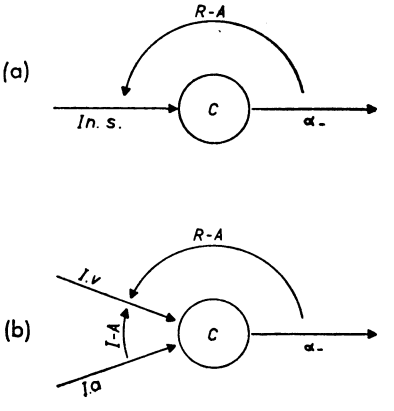


Fig. 3. Retroacción de la disminución del ritmo α sobre la información sensorial (In. s.). C, córtex; I. v.; información visual; I. a., información auditiva; I. A., interacción de I. a. sobre I. v.

en cuenta los datos neurológicos; y si se la admite, cabe entonces *hacer entrar en un marco cibernético sencillo* los datos precedentes y *unificar su interpretación.*

Así pues, según la figura 3 (a), se puede considerar que las variaciones del efecto (la disminución de las ondas α) está unida a su factor (el influjo de información) por una verdadera retroacción: la cantidad de energía que corresponde a la disminución de α anula una parte de la energía del influjo. Y esta "feed-back" interna hace que el sistema tienda a un verdadero *estado de equilibrio entre las ondas α y la energía informadora que corresponde a las mejores condiciones para la percepción sensorial.*

El tiempo de latencia toma ahora una significación completamente precisa: se trata, pura y simplemente, del tiempo de retraso *(la histéresis)* de esta retroacción.

Según la figura 3 (b), que alude al caso de una dualidad —visual y auditiva— de estimulación sensorial, la derivación preferente del influjo, que hemos analizado ya, corresponde a una interacción negativa entre los dos órdenes de estímulos; interacción que ya no hace necesaria disminución alguna de las ondas α, y que permite entrever, incluso, la posibilidad de que aumente su amplitud.

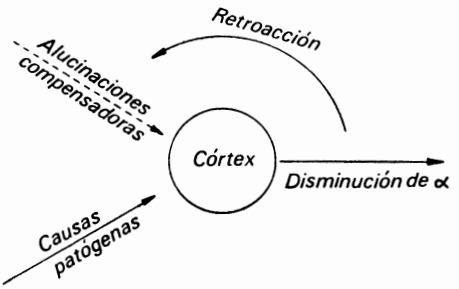


Fig. 4. Esquema del equilibramiento «alucinatorio» de la retroacción provinente de una perturbación tóxica o psíquica del ritmo α.

La figura 4, por fin, corresponde al caso de las alucionaciones visuales (tóxicas o psíquicas), y su interpretación es más delicada, pero también más significativa. Durante el desequilibramiento patológico de la sensibilidad cortical por un efecto tóxico o psíquico que produzca una disminución de las ondas α, la retroacción que corresponde a la figura 1 a partir de estas ondas se lanza, podría decirse, "a la búsqueda" de un elemento equilibrador, puesto que ella misma no puede ya vincularse a una energía informativa de procedencia externa. Encontramos aquí el fenómeno de tendencia al equilibrio que habíamos analizado en las páginas precedentes, a propósito de la regularización de los organismos sensibles, al evocar el modelo de las "tortugas" electrónicas. Sobre un terreno viciado

patológicamente, esta tendencia al equilibrio constituye por sí misma una verdadera información, comparable, desde el punto de vista de los efectos, a la del esfuerzo o la abstracción conceptuales; y la alucinación visual es entonces la respuesta cibernética a la realización de la "satisfacción" de este equilibrio patológico.

Como esta respuesta se ha construido por centros especializados en la recepción de mensajes visuales, es muy natural que se traduzca por reacciones de este mismo orden, si bien violentamente perturbadas en cuanto a las formas y los colores. Lo cual supone, evidentemente, que no existan posibilidades de retroacción efectivas y eficaces entre la disminución de α (es decir, un cambio del estado biológico del cerebro) y las causas patológicas; y si esta última retroacción es posible, el equilibrio puede realizarse de un modo efectivo sobre un terreno físico-químico estable, y ya no tiene necesidad de vincularse a ninguna reacción alucinatoria. Vemos el interés que puede presentar semejante noción para comprender mejor la génesis de los fenómenos alucinatorios, que desempeñan un papel tan grande en la patología de las sensaciones, y, sobre todo, para comprender las circunstancias, a veces paradójicas, de su aparición y desaparición.

Es evidente que en la práctica los hechos son más complejos que las esquematizaciones que acabamos de indicar, con una simplificación voluntaria destinada a hacer que estas nociones sean más precisas en el espíritu del lector. Por ejemplo, las interacciones de la figura 3 no son externas, tal y como las hemos representado, *sino internas,* y se producen, probablemente, entre dos centros neuroperceptivos localizados; y además de esta interacción habría que considerar también las retroacciones coexistentes entre la disminución de las ondas α y la doble estimulación auditiva y visual.

III. LO OBJETIVO Y LO SUBJETIVO: SU ENLACE POR RETROACCION

El lugar que, según hemos visto, ocupa la transferencia energética en la elaboración conceptual puede ayudarnos a comprender mejor las relaciones entre lo objetivo y lo subjetivo y a establecer entre ambos un enlace cibernético del tipo por retroacción. El filósofo que se preocupa de este capital problema de las relaciones entre el objeto y el sujeto tiene tendencia, cuando aborda la cuestión de la información, a confundir totalmente la información cibernética con la que podría calificarse de "psíquica", y que se identifica para él con una adquisición de conocimientos. Ahora bien, esta última, que es esencialmente un fenómeno subjetivo, es, en realidad, un efecto que, a través de los centros neurológicos considerados como efectores, depende de un factor causal capital: la información en el sentido cibernético del término, que aparece aquí identificada con lo objetivo. Y, según todo lo que hemos expuesto más arriba, como esta

adquisición de conocimientos desemboca siempre en una información conceptual, ésta actúa a su vez retroactivamente sobre la información cibernética causal que se identifica a lo objetivo; podemos, pues, asentar lo representado en la figura 5. Por consiguiente, el punto de vista cibernético aplicado al nivel de la información neuropsíquica permite *precisar el enlace entre lo subjetivo y lo objetivo y situar los datos de ambos.* Según hemos podido desarrollar en marzo de 1961 en la Sorbona, ante la Société Française de Philosophie (con ocasión de una comunicación de DE BEAUREGARD), este enlace se constituye esencialmente a lo largo de un proceso de retroacción en el que interviene la información cerebral en sus dos modalidades, pues la información conceptual es el punto de partida del proceso retroactivo que repercute sobre la cantidad de información sensorial, es decir, sobre la modalidad última de transformación del elemento

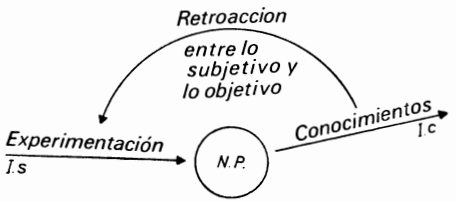


Fig. 5. La retroacción existente entre lo subjetivo y lo objetivo. N. P., centro del neuropsiquismo; I.s., información sensorial; I. c., información conceptual.

objetivo; así pues, este *enlace por retroacción entre lo subjetivo y lo objetivo* se nos aparece como un *elemento irreductible y fundamental del conocimiento,* que depende esencialmente de la especificidad misma del sujeto, o, más exactamente, de la funcionalidad específica de sus centros neuropsíquicos. Es absolutamente vana e ilusoria la pretensión de reducir esta última —o, *a fortiori,* anularla— cuidando al máximo la "objetividad" experimental (inscripción eléctrica, registro y detección automáticos, etc.): todas estas precauciones, deseables y perfeccionables, y cuyo rigor es fundamental, pueden servir para aumentar la cantidad de información sensorial verdadera (esto es, verdaderamente referente al experimento que se realice); pero, una vez que esta información pone en marcha sus transformaciones de acción en los centros receptores del cerebro y que se desprende de ellas la información conceptual de modo concomitante a la adquisición de un conocimiento, se establece el enlace retroactivo de lo subjetivo a lo objetivo por el hecho mismo de la retroacción del concepto sobre la sensación, y ello independientemente de todos los aparatos experimentales, *en el interior mismo de los circuitos de la neuropercepción cerebral.*

Creemos que tiene un enorme interés hacer notar hasta qué punto el

enfoque cibernético, aplicado correctamente, viene a traernos unas precisiones básicas muy importantes sobre uno de los problemas principales del conocimiento, que ha suscitado siempre el interés complementario de los filósofos y de los psicólogos.

Podemos considerar, además, que es precisamente durante el paso —o, mejor, la transformación— de la *acción-información* en *acción-percepción* cuando se desprende, a través de los neurorreceptores del cerebro, la confrontación de las propiedades intelectuales estructurales, de las que unas subyacen a las realidades matemáticas de la acción y otras han salido, según parece verosímil, de una confrontación o de una combinación de las primeras. Pero de este conjunto va a nacer, al mismo tiempo que el hecho psicológico del conocimiento, la información conceptual, nueva for-

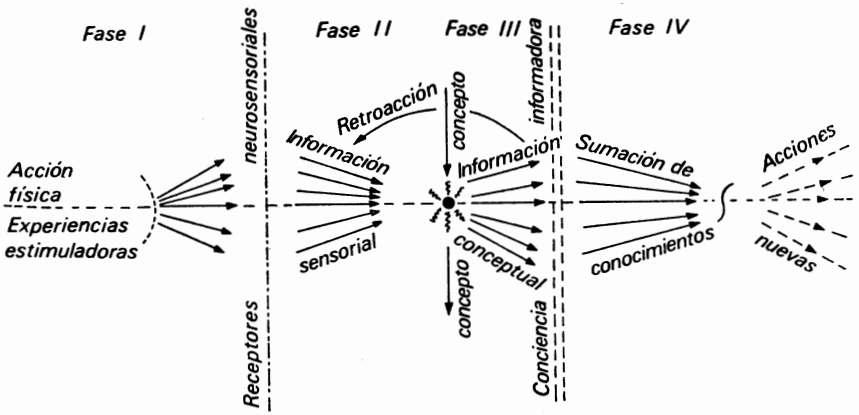


Fig. 6. Esquema de las secuencias transformadoras de la acción informativa en su recorrido neuropsíquico. Las fases I y II son simétricas con respecto a los receptores sensoriales y las III y IV con respecto a la conciencia informadora; los dos elementos se presentan en forma *conjugada,* y el conjunto es simétrico relativamente *a la formación del concepto.*

ma de transformación de la acción, que actuará retroactivamente sobre la acción informativa de base *en el interior mismo de los centros neuropsíquicos.*

Importa mucho, pues, precisar que esta información conceptual *no es el concepto mismo,* ni tampoco su causa, sino, por el contrario, el efecto primario, la traducción informativa inmediata de la aparición del concepto (figura 6).

Desde un punto de vista filosófico general, se puede considerar que en la sucesión de acontecimientos que ponen en marcha y transforman la información sensorial hay una alternancia simétrica —con relación a la aparición del concepto— de dos fases complementarias.

La primera fase corresponde a las creaciones experimentales o a los

fenómenos observables del mundo físico-químico de donde emergen las emisiones de fotones o cuantos de energía, o, dicho de un modo más general, las ondas de acción que van a golpear sobre nuestros receptores sensoriales. Esta fase es esencialmente *entrópica* o *divergente* (el hecho mismo de la acción tiende *naturalmente* a diluirse en la divergencia de sus ondas).

La segunda fase es la que corresponde a la información sensorial propiamente dicha, tal y como avanza a partir de los receptores externos hasta los centros neuropsíquicos. Es una fase basada esencialmente sobre la diferenciación y la selección de sistemas, y es simultáneamente *neguentrópica* (o sea, inversa con respecto al aumento de entropía) y *sintrópica,* esto es, fundada en cierta *convergencia* de las modalidades transformadas de la acción-información hacia los efectores neuropsíquicos.

A la salida de esta segunda fase es donde pueden producirse la *elaboración conceptual* y la aparición de nociones de propiedades estructurales resultantes de las modalidades de transformación de la acción. Podemos representar, pues, esta aparición del concepto como un centro de convergencia con respecto a las secuencias de la acción informadora.

Y a partir de él aparece una tercera fase, que consiste en la liberación de nuevos elementos de acción, que corresponden a la información conceptual. Esta fase —y tenemos aquí un punto fundamental— es entrópica en su origen; esto es, la información conceptual tendería por sí misma a diluirse en ondas de acción divergentes si no experimentase inmediatamente una diferenciación en los circuitos neurorreceptivos, gracias a la cual desemboca en la adquisición y sumación de conocimientos, que es un fenómeno esencialmente neguentrópico y sintrópico —con lo que llegamos a la cuarta fase.

Es preciso darse cuenta con toda claridad en este punto de que este análisis de los fenómenos, para ser verdaderamente satisfactorio, obliga a invocar y a hacer que intervenga el papel de dos elementos fundamentales: en primer término, el de la *consciencia informativa,* que permite, por ejemplo, captar de un solo golpe en la información conceptual la información común a una serie de informaciones, y que se presenta como *el instrumento esencial de convergencia* que lleva a la adquisición de conocimientos; y, en segundo lugar, *la memoria,* que se nos ofrece aquí como el elemento operador que permite la sumación de los conocimientos, por una parte, y que, por otra, constituye una capital fuente de información conceptual de reserva, que puede ser lanzada de nuevo en todo momento directamente a nuevos circuitos neuroperceptivos y enriquecer luego, por retroacción, la información sensorial concomitante. La consciencia y la memoria conducen, además, a considerar aquí, como factores nuevos de información conceptual, [los abarcados por] la noción de temporalidad: se trata ahora, ante todo, del *tiempo psicológico* inherente al concepto de cambio (pues decir que el tiempo es un cambio percibido por la consciencia equivale absolutamente a decir que una consciencia es la proyección

en el tiempo de la percepción de un cambio); ahora bien, este tiempo psicológico tiene también —lo mismo que el tiempo físico— una estructura discontinua, pese a las apariencias de continuidad, que no son otra cosa que un efecto global debido esencialmente a los encabalgamientos de las percepciones: vivimos, en realidad, en un presente eterno, que psicológicamente no es nunca igual [*semblable*] a sí mismo, y este presente es una *noción límite,* que se destruye por el hecho mismo de alcanzarse. Tales discontinuidades psicológicas y el sentido de su registro por la consciencia informativa son en sí mismas fuentes suplementarias de información, con las que se confrontan los elementos de la información conceptual (frente a los cuales aquéllas parecen actuar a modo de *cribas* y de *orientaciones,* que determinan, precisamente, el paso a la convergencia neguentrópica de las primeras secuencias entrópicas de la información conceptual).

Todo esto nos lleva, evidentemente, a atacar problemas que exceden un poco del marco preciso de esta exposición, aun cuando la prolongan en un plano estrictamente lógico sobre los dominios de lo psicológico y —más allá de la psicología— de lo espiritual. Por consiguiente, no podemos sino esbozar sumariamente tales prolongaciones, sobre las que nos proponemos volver en páginas de diferente índole. Vamos a subrayar únicamente, en lo que a ello respecta, hasta qué punto las perspectivas desarrolladas más arriba hacen ver que en neuropsicofisiología el punto de vista cibernético exige, todavía más que en cualquier otro campo, que se sepa verdaderamente mirar por encima de los compartimentos estancos de las especializaciones excesivas, y que se reaccione frente a esa subdivisión excesiva de la investigación que tanto lamentaba WIENER y que hace que cada cual, demasiado preocupado por su propio problema, tenga una desagradable tendencia a mirar el problema adyacente "como perteneciente en propiedad al colega que vive tras tal o cual puerta de este o aquel lado del pasillo".

IV. CONCLUSIONES GENERALES

Estamos viendo hasta qué punto las consideraciones cibernéticas son capaces de aportar alguna luz nueva sobre la antigua cuestión de las relaciones entre lo psíquico y lo orgánico, tan vieja como la medicina, e incluso contemporánea de los primeros ejercicios del pensamiento humano: por el estudio de las reacciones bioeléctricas del cerebro y de las transferencias electrónicas concomitantes a la elaboración del concepto, a la percepción de las formas y a las manifestaciones de la consciencia informadora... Y, por la noción de las finalidades de equilibrio que se proponen a la regulación neuropsíquica, permiten, no comprender mejor, sino *sorprender mejor* algunos de los puntos en que se opera, a través de nuestros receptores biológicos más altamente especializados, la misteriosísima pero indiscutible articulación de la materia y el espíritu. Finalmente, nos parece

que el punto esencial del problema puede reducirse a estas dos nociones (que el filósofo científico no encontrará extraño que sean complementarias):

1. Cada concepto con sus equivalentes formales —esto es, en suma, un conjunto de propiedades de estructura intelectual y de relaciones (asimismo de orden intelectual) entre ellas— se traduce a través de nuestros receptores neuropsíquicos, y exactamente lo mismo que le ocurre a un estímulo sensorial, por una transferencia de cargas eléctricas; y, aún más, por cierta distribución espacial y cronológica de tal transferencia.

2. Nuestros receptores neuropsíquicos están constituidos biológicamente de tal modo que pueden traducir las sucesiones de cargas electrónicas que los afecten a través de los circuitos sensoriales por una serie de representaciones formales, que avocan así, en definitiva, cierto número de propiedades estructurales o de combinaciones de ellas.

Es evidente que en los agrupamientos de entrada de fotones o de cuantos de acción (a los que se reduce el estímulo sensorial) hay diferencias de orden puramente energético, pero éstas no pueden explicar la infinita gama de variedades de las percepciones; y asimismo parece que lo que explica esta extraordinaria variedad de respuestas son las combinaciones tempóreo-espaciales de tales agrupamientos.

De este modo, la elevada especificidad de nuestros receptores neuropsíquicos consistiría, ante todo, en poder traducir en propiedades estructurales y en combinaciones de ellas las variaciones de energía, las distribuciones especiales y las separaciones cronológicas de los grupos de *quanta* y de fotones que los afecten, y, recíprocamente, en hacer corresponder a las elaboraciones conceptuales y formales transferencias energéticas capaces de afectar, entre otras cosas, a la actividad bioeléctrica y a los diversos equilibrios orgánicos de tipo homeostático.

Que una dignidad biológica de valor tan incomparable parezca ser atributo específico de unos agrupamientos celulares cuya estructura fundamental, estática y aislada, no semeja presentar diferencias esenciales con la de las demás células orgánicas, constituye, evidentemente, una cuestión cuyo simple enunciado nos haría correr el riesgo de vernos arrastrados mucho más allá de los dominios de este estudio. Baste considerar, por ahora, hasta qué punto, por lo pronto, *solamente un estudio cibernético correcto de los fenómenos de la percepción neuropsíquica* puede permitir que ataquemos en toda su complejidad los problemas de la actividad funcional de nuestros centros cerebrales y cómo ese mismo punto de vista puede permitirnos que subrayemos, presintamos y propongamos nuevos y poderosos motivos de interés por esas relaciones entre lo psíquico y lo orgánico que la biología y la medicina moderna se esfuerzan ahora, cada vez más, en examinar fisiológicamente y traducir terapéuticamente.

V. COMPARACION ENTRE LA INFORMACION CEREBRAL Y LAS SECUENCIAS INFORMATIVAS DE LAS REGULACIONES ENDOCRINAS

En el estudio de las regulaciones del sistema endocrino se ve uno llevado a invocar dispositivos homeostáticos, como, por ejemplo, el que se realiza en el funcionamiento hipofisario en sus relaciones con las glándulas genitales y la tiroides (se trata de un verdadero *homeóstato gonadal).*

Desde el año 1950, y a propósito de la acción de diversas dosis de rayos X sobre la hipófisis, nos hemos visto conducidos a exponer —delante de la Société Française de Thérapeutique et Pharmacodynamie— la noción de que era preciso considerar que el funcionamiento endocrino se produce de una manera discontinua, que forma etapas sucesivas de acción constante separadas por intervalos libres. Durante estos últimos la glándula recibe las estimulaciones o los enfrenamientos de las otras endocrinas unidas a ella, las cuales, a su vez, entran en actividad precisamente por efecto de las actividades efectoras del período de acción; esto es lo que entonces habíamos llamado *cuantificación fisiológica,* que corresponde al hecho de que, si se analizan los fenómenos durante intervalos temporales suficientemente reducidos, una endocrina no funciona más que cuando se llega a cierta suma de índices afectores (que provienen, ante todo, de las endocrinas unidas a ella); y el intervalo necesario para que el substrato efectúe la suma de los índices es fisiológicamente libre. Punto de vista que nos había permitido entonces dar una explicación satisfactoria de ciertos resultados de la acción de dosis variables de rayos X sobre la hipófisis, y, además, de la imposibilidad de actividad funcional alguna en determinados casos.

En relación con el tema que nos ocupa en esta exposición, podemos hacer observar que la sumación de los índices de oscilación fisiológica de una endocrina corresponde, para los receptores que le estén unidos, a una información hormonal. Información que será efectora para aquélla y afectora para éstos; pero, tanto en un caso como en el otro, el substrato informativo es una emisión de moléculas hormonales o parahormonales y, por consiguiente, consiste en un substrato infinitamente más denso, más material, más másico que las sucesiones puramente energéticas de la información cerebral.

Vertido —en general— en el torrente circulatorio, sufre, por otra parte, la lentitud relativa de este flujo, de modo que su acción puede parecer continua; pero, en realidad, es también discontinua, si bien los intervalos de discontinuidad son, de hecho, muchísimo mayores que los que separan las emisiones fóticas o cuánticas sucesivas, que forman la base de la información sensorial del cerebro.

He aquí, pues, las diferencias fundamentales que separan netamente

la información endocrina de la cerebral: masicidad del substrato y dilatación de los intervalos de discontinuidad.

Por otra parte, cabe interpretar la acción de vuelta de los receptores endocrinos de la primera endocrina como una verdadera retroacción de los propios *quanta* de acción fisiológicos de ésta sobre su substrato, a través de la acción reguladora de los receptores; y de esta retroacción va a depender (véase la fig. 7) el valor del intervalo cronológico de discontinuidad, que puede ser + o —. Creemos que es posible, cibernéticamente, comparar esta retroacción del *quantum* fisiológico de acción de la endocrina sobre el intervalo libre (durante el cual recibe la información

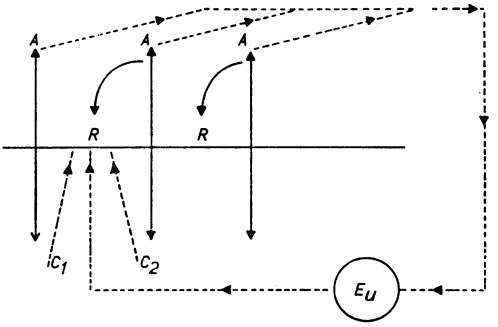


Fig. 7. Esquema de la cuantificación fisiológica de un homeóstato endocrino. A, índice de acción; R, intervalo libre; E_u, endocrina unida; C_1 y C_2, otros factores causales.

extrínseca) con la retroacción de la información conceptual sobre la sensorial, tal y como acabamos de analizarla en la información cerebral; pero también en el caso presente la retroacción se forma a lo largo de un intervalo cronológico enormemente extenso con respecto a la retroacción de la información conceptual del cerebro, ya que tiene que elaborarse, de hecho, a partir de la endocrina [o endocrinas] con que esté asociada, y —todavía más— por mediación de pesados agregados moleculares que se desplazan con velocidades lentísimas comparadas con las de los influjos electrónicos.

A ello se agrega que semejante retroacción endocrina no hace aparecer sino nuevas propiedades químicas, que, por inscribirse inmediatamente en nuevos componentes hormonales, son absolutamente inadecuadas, como es claro, para dejar libres unas propiedades estructurales (que, por lo demás, no podrían ser percibidas).

Así pues, si se quisiera comparar cibernéticamente —sólo desde el punto de vista del valor y la ordenación de las secuencias informativas— el funcionamiento cerebral y el de un homeóstato endocrino, podría decirse que éste funciona poco más o menos como el cerebro, pero como

un cerebro enormemente incompleto y, sobre ello, extremadamente lentificado.

Mas también cabría dar la vuelta al problema y preguntarse si las analogías cibernéticas —por toscas y meramente aproximadas que sean— que pueden encontrarse, desde el punto de vista de la información, entre el homeóstato endocrino y el funcionamiento cerebral no existen más que porque en el primero hay, además de la endocrina que tengamos ante todo en cuenta, otro polo endocrino asimismo receptor e informador.

Tomando ahora la analogía en sentido inverso y elevándola al nivel de las características infinitamente matizadas, estructuradas, próximas y confrontadas que presenta la información cerebral con respecto a su retroacción de lo conceptual sobre lo sensorial (que es, a su vez, informadora y generadora de propiedades de estructura), ¿no podría concebirse, entonces, que no es posible tal equilibrio dinámico más que porque al lado —o en el seno— del neuropsiquismo orgánico propiamente dicho tiene que existir otro polo receptor e informador, "alimentado" en parte por el primero, pero al que asimismo informe, y ello tanto más vigorosamente cuanto mejor "alimentado" esté por él? El hecho de que no haya soporte material no disminuye absolutamente nada del rigor de su necesidad cibernética..., y ¿no estarían de nuevo allí, a la salida de semejante perspectiva, el lugar y el papel del espíritu?

RESUMEN

En una serie de estudios sobre la biología y la cibernética nos habíamos visto obligados a mostrar cómo cabe acercar entre sí, en el estudio del comportamiento general del organismo humano, la información sensorial —esto es, la percepción de las estimulaciones extrínsecas por los centros neurosíquicos— y la información procedente de un concepto; dicho de otro modo, cómo es capaz el concepto de informarse en una transferencia energética biológicamente perceptible. El estudio de los neuroencefalogramas, en particular, hace ver que el esfuerzo por percibir produce las mismas reacciones de detención de las ondas cerebrales de base (ritmo α) que la percepción de un haz luminoso heterogéneo —papel de los factores psíquicos sobre la actividad eléctrica básica del cerebro que se encuentra en el animal lo mismo que en el hombre.

A partir de tales hechos nos ha parecido posible proponer un esquema del equilibrio cibernético entre las ondas α y la energía de información de la percepción sensorial; concepción que nos ha permitido, incluso, aportar un esquema de la formación de ciertas alucinaciones "compensadoras" de determinados desórdenes patológicos (como ocurre con algunas alucinaciones visuales). Pero el interés de

semejante proceso de equilibramiento reside en hacer comprender cómo una modalidad puramente psíquica o conceptual puede proporcionar, por medio de modificaciones de transferencia de cargas electrónicas, la retroacción compensadora que haga variar la excitabilidad eléctrica de base del cerebro en el sentido de reestablecer un equilibrio perturbado.

Así pues, la elevada especificidad de nuestros receptores neuropsíquicos consistiría, ante todo, en poder confrontar entre sí —en forma capaz de hacer que emerjan las propiedades formales— las distribuciones espaciales y cronológicas de las secuencias energéticas que reciban, y, recíprocamente, en hacer corresponder a las elaboraciones conceptuales unas secuencias de energía que puedan repercutir retroactivamente sobre la actividad bioeléctrica del cerebro y las homeostasias que dependen de él.

DISCUSION

SCHOUTEN.—Si le he entendido bien, usted ha enseñado al sujeto una señal roja y ha tratado de convencerle de que era verde, ¿no es así?

HUANT.—Efectivamente, se hacía ver al sujeto una señal roja, pero no intentábamos convencerle de que era verde; simplemente se le proponía la pregunta: "Es una luz verde, ¿no?", para sugerirle el concepto de verde y oponerlo a la percepción sensorial del rojo.

SONGAR.—La llamada *réaction d'arrêt* está caracterizada por una disminución de la amplitud de la actividad de fondo de la corteza cerebral, pero, a la vez, por un aumento de su frecuencia, lo cual es consecuencia de una desincronización, que se debe a una activación originada por la formación reticular del tronco encefálico. Por lo tanto, me parece que sería mejor hablar de *réaction d'éveil* en lugar de *d'arrêt.*

Si el mecanismo principal de esta reacción de despertamiento es la organización multineuronal y polisináptica de la parte rostral de la formación reticular del tronco encefálico, y si los estímulos repetidos no dan origen a tal reacción, ¿es posible hablar de un *estado de adaptación* de dicha formación?

HUANT.—Estoy de acuerdo en lo que concierne a la realidad del fenómeno descrito; pero el término "reacción de detención", que atiende al esencial hecho de la disminución de la amplitud, parece consagrado por el uso, al menos en Francia.

Me parece muy posible, en efecto, hablar de semejante *estado de adaptación.*

Modelo cibernético de memoria activa con capacidad de recepción ilimitada

Por J. L. SAUVAN

INTRODUCCION

No parece que el método experimental vaya a elucidar de inmediato los problemas que presenta la memoria en lo que se refiere a su soporte y, sobre todo, a su funcionamiento.

En casos semejantes el investigador dispone de un expediente que, por una vía indirecta, lleva a la experimentación, siempre necesaria para la certidumbre: inapreciable recurso que está constituido por el método de los simuladores, método probado desde siempre, cibernético *avant la lettre;* pues las hipótesis de trabajo pertenecen a la categoría de los simuladores, lo son de índole intelectual.

Toda hipótesis acerca del soporte de la memoria incluye una implicación metafísica. En efecto, la construcción de un simulador exige que se introduzcan inmediatamente las propiedades esenciales que, según se estime, pertenecen al objeto de investigación; es preciso, por consiguiente, afirmar desde el principio la propia posición en cuanto a la posible materialidad de los soportes de la memoria, y esta posición determina la idea que quepa hacerse de la naturaleza del alma. Vemos así por qué son tan ásperas las controversias en torno a un tema que no debería remover más pasión que las demás investigaciones fisiológicas.

El primer cuidado del espiritualista será el de hacer que su hipótesis sea incompatible con la posibilidad de un soporte físico, por ejemplo, atribuyendo a la memoria humana la potencia del continuo; tal es la posición del ingeniero y general del Aire VERNOTTE en el simposio sobre *Cibernética y conocimiento* (Zürich, 1956-1957): puesto que la memoria —lo mismo que el pensamiento en general— es capaz de contener las nociones de los conjuntos *alef* 1 y *alef* 2 *, y puesto que, además, no hay punto alguno de los mismos que el pensamiento no pueda alcanzar (cosa

* En rigor, como se sabe, *alef* 1 es el mínimo número cardinal mayor que el correspondiente al conjunto de todos los números (ordinales) menores que el (número) ordinal del conjunto de todos ordinales finitos (esto es, «1.º», «2.º», «3.º»...), y *alef* 2, el cardinal siguiente a aquél; pero pueden denominarse con estos nombres los conjuntos correspondientes, como hace aquí el autor. *(N. del T.)*

distinta de la posibilidad de alcanzarlos todos), la memoria tiene que participar necesariamente en las propiedades de lo que ha elaborado y, por tanto, tener la potencia del continuo. (Al parecer, puede ponerse en jaque esta tesis.)

Si de lo que se trata es, por el contrario, de defender una metafísica hilemórfica o una concepción puramente materialista, o si lo que pretende el investigador es rechazar por principio toda hipótesis que le impida continuar sus inquisiciones, el simulador incluirá un soporte discontinuo de la memoria, lo cual permite hacer que vuelva al mundo material el objeto mismo de la investigación.

ORGANIZACION DE LO DISCONTINUO EN LOS SIMULADORES DE LA MEMORIA

En el dominio de la explotación lógica de los engramas, que es, en primera aproximación, el que nos interesa, el almacenamiento de las informaciones tiene lugar en forma analítica: cada hecho memorizado se diseca por los captadores en tantos elementos como sea necesario encontrar en él en el momento de la extracción fuera de la memoria, cada uno de estos elementos se memoriza aisladamente, y es preciso memorizar, además, la ley de relación que una los distintos elementos del hecho, ley que debe manifestarse durante la extracción. Por ejemplo, en un espacio ocupado por puntos materiales absolutamente idénticos, la existencia de un punto en un lugar dado es un fenómeno binario: o bien hay allí un punto o no lo hay; mas, de hecho, ello se memoriza bajo la forma de tres coordenadas (esto es, mediante un mínimo de tres puntos por cada uno que haya que describir), y es menester que del modo que sea se memorice la significación exacta de cada valor así memorizado —aunque no sea más que valiéndose de un código que explique que las coordenadas se enumerarán en un orden fijo: primero x, luego y y por fin z.

La notable eficacia de este método en la matemática no obliga a suplantar con él todos los demás en todos los restantes dominios. En lo que a nosotros afecta, introduce una pérdida enorme de rendimiento y disocia las propiedades, que es preciso reunir de nuevo, con grandes dificultades, cuando se quiere manipular en bloque los hechos —cosa que constituye una función normal de la memoria (y las grandes computadoras [*ordinateurs*] son incapaces de asumir estas funciones a su ritmo habitual).

Las realizaciones espontáneas del espíritu humano tienen, por el contrario, una forma sintética. Cabe asimilar las palabras de una lengua a puntos determinados del diccionario (el referencial); y cualquier punto, que no puede manifestarse más que de dos maneras (estar presente o ausente), es soporte de una cantidad de información enorme (por ejemplo, una palabra tal como "Europa").

Hagamos una última observación en lo que se refiere a la naturaleza

de la memoria: se ha hecho notar muy acertadamente que los captadores y los efectores tienen una fisiología discontinua; y sería sumamente inverosímil que el "elemento opaco" ["*boîte noire*"] que manipule el pensamiento tuviese dos funciones de transformación, de lo continuo en discontinuo y viceversa, a la salida y a la entrada.

HIPOTESIS REFERENTES A LOS SOPORTES BIOLOGICOS DE LOS ENGRAMAS

Pueden reducirse a tres:

1. *Soporte formado por neuronas.*—Durante mucho tiempo, las neuronas han parecido ser los únicos elementos del sistema nervioso central capaces de adoptar y conservar diversos estados diferentes. Esta hipótesis, que parece perder terreno, permite contar con 10^{10} elementos y 10^{12} enlaces, por lo menos.

2. *Soporte formado por vesículas de Bok* *.—Es la hipótesis más atractiva: estas vesículas pueden adoptar dos estados estables, y cada una de ellas está en una relación especial con diez conductores exactamente; en cuanto a su número, debe de ser, al menos, 10^{12}.

3. *Soporte formado por las moléculas de ADN o de ARN.*—Su número es inmenso, y no se ha evaluado todavía. Estas moléculas pueden adoptar asimismo varios estados y restituir la información; mas, por un lado, no están "amarradas", y no se sabe si su enlace con los eventuales canales de información sería permanente; y, por otro, los mensajes que emitirían serían radiaciones, y no se tiene la menor idea de la articulación que podría existir entre los captadores y los efectores.

Por consiguiente, un simulador de la memoria biológica tal y como el que vamos a presentar puede exigir, sin caer en contradicción con las hipótesis plausibles, un número de elementos que puede ascender hasta 10^{14} o algo más.

LA NOCION DE ACTO

El funcionamiento de una máquina puede describirse siempre por una sucesión de acontecimientos de estructura idéntica que se engranen apretadamente entre sí: son los *actos*. El acto es, verdaderamente, la "molécula" del funcionamiento de los sistemas.

Llamaremos *acto elemental* a la terna siguiente:

a) El estado inicial del medio según lo perciba el sistema considerado a través de sus captadores; es la *situación de partida* (SP);

* Son unas vesículas diminutas (alrededor de 5 Å de diámetro) que, al parecer, se encuentran entre las anastomosadas fibras de los ganglios nerviosos; y de los estados que adoptaran (por efecto de los impulsos nerviosos de las fibras) dependerían las posibles configuraciones futuras de impulsos en esas mismas fibras. *(N. del T.)*

b) El modo de intervención del conjunto de los efectores sobre este medio; es la *acción* (a); y

c) El estado final (transformado por la acción) del medio tal y como lo perciba ahora el sistema; se trata de la *situación resultante* (SR).

Las situaciones corresponden a estados determinados del conjunto de los captadores, y las acciones, a órdenes precisas del conjunto de los efectores. (Más adelante definiremos el acto complejo, AC.)

El acto puede definirse debido al hecho de que los captadores y los efectores son órganos que funcionan de manera discontinua. Puede advertirse que:

1. La situación resultante de cada acto constituye la de partida del acto siguiente; por consiguiente, el funcionamiento queda descrito completamente por una especie de "espiral" ininterrumpida de actos que se engendran unos a otros, y constituye la historia "objetiva" de la máquina (es decir, su historia vista desde fuera).

2. Dado que el número de captadores y el de efectores, así como el de sus estados, es finito, el número de actos posibles es, asimismo, finito. Si se trata de sistemas binarios, y si c es el número de captadores y e el de efectores, la cantidad de actos posibles es $2^c \times 2^e \times 2^c$, número que, en cuanto e y c aumentan incluso moderadamente, no sólo se hace grande con mucha rapidez, sino verdaderamente inmenso. (Los proyectos de realización exigen la puesta en práctica de procedimientos que permitan economizar elementos.)

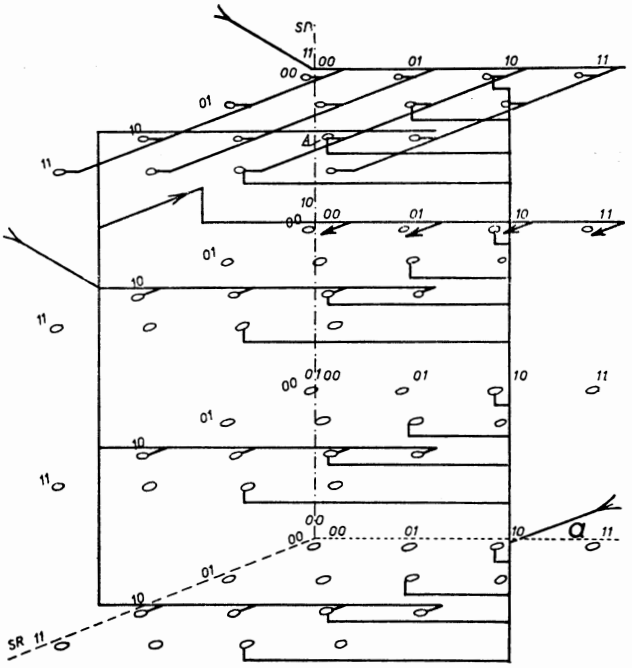
3. No puede existir ninguna noción de tiempo intrínseco a esta memoria, noción que está reemplazada por la de sucesión y por todos los informes que puedan deducirse de ella. (Cabe introducir el "tiempo del reloj" en forma de percepción de un acontecimiento exterior, que fraccione así temporalmente la sucesión de actos.)

PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LA CONSTRUCCION DE UNA MEMORIA ACTIVA

En una memoria de esta índole, todas las informaciones referentes a un acto —y pueden ser muy numerosas— se memorizan sobre un solo elemento binario, lo que equivale a decir que ha de poseer $2^c \times 2^e \times 2^c$ elementos binarios destinados a soportar los engramas. Mientras el acto correspondiente no haya tenido lugar, el elemento binario permanecerá en la posición 0; y una vez que se haya realizado pasará definitivamente a la posición 1 (en este último caso, la reiteración del acto no producirá cambio alguno en el conjunto de los elementos binarios).

Para realizar semejante memoria es preciso disponer la colección prevista de elementos en una matriz tridimensional (fig. 1) cuyas dimensiones correspondan, una a la situación de partida, otra a la acción y la última a la situación resultante.

En esta matriz, cada situación resultante está enlazada con todos los elementos pertenecientes al subconjunto caracterizado por una situación de partida idéntica a aquella situación resultante.



ACTO 11-10-10

Fig. 1.

Un elemento pasa a la posición 1 cuando se reúnen los tres factores del acto que represente; y, a la inversa, "preguntando" —en una sola operación— al elemento binario se sabe si el acto correspondiente ha tenido lugar, y se posee una descripción analítica de todos los factores de tal acto.

Llamamos, por analogía biológica, "centro de integración" (CI), o bien centro de inscripción, al aparato constituido por la matriz de los elementos de la memoria acompañada del sistema de extracción de informaciones (que no vamos a describir); pues un solo elemento es soporte de informaciones referentes a sucesos diversos, de percepciones y de órdenes de actuar. Puede verse, además, que el funcionamiento crea un ciclo o bucle regulador que pasa por el medio, la memoria y el sistema efector, y vuelve de nuevo al medio.

ESTRUCTURACION DE SEGUNDO GRADO

La necesidad de reducir el número de elementos la hace indispensable. Puede acometerse esta economía de varios modos simultáneamente: empalmando diversos captadores sobre un mismo canal de información (como sucede en fisiología) y también haciendo que un solo canal pueda mandar varios efectores (métodos que no hemos de describir aquí).

Un tercer medio de conseguirla consiste en yuxtaponer varios centros de integración, cada uno de los cuales disponga de pocos canales: en tanto que veinte canales de captadores y veinte de efectores exigirían un CI dotado de varios billones de elementos, cinco CI que en conjunto dispusieran de igual número de canales no necesitarían más que 23.000 elementos. Así pues, cabe variar el reparto de los canales según el resultado que se busque.

Los centros de asociación (CA) están destinados a hacer solidarios los distintos CI y registran la simultaneidad de las situaciones y la de las acciones en los CI que asocien. Se comprende que los captadores y los efectores de los diversos CI serán de naturaleza diferente: sean los CI número 2 y número 3 tales que el primero tenga m captadores binarios y el segundo n; el CA correspondiente tendrá mn elementos, que le permitirán registrar todas las combinaciones posibles de los captadores de 2 y de 3. Y lo mismo ocurrirá con los efectores.

Un medio determinado corresponde a cierto grupo de "situaciones" en el conjunto de los CI, grupo que constituye una situación compleja, SC. Existen, asimismo, acciones complejas, aC, y actos complejos, AC.

La existencia de los CA proviene de la necesidad en que nos encontramos de impedir la extracción de una combinación cualquiera de situaciones elementales que no corresponda en modo alguno a una situación compleja realmente registrada. En el dispositivo de extracción, la aparición de situaciones ya memorizadas está subordinada a la inscripción de su coexistencia en los CA.

En semejante concepción, cada CI corresponde a un sistema fisiológico en bucle cibernético (el sistema de audición-fonación, por ejemplo); y en esta perspectiva cabe preguntarse si no es obligatorio que todo *sistema* de captación fisiológica se asocie a un sistema efector.

Estructuración de los engramas.—Esta memoria funciona por tiempos sucesivos qué corresponden a la duración de un acto. En cada tiempo se forma en los CA un enlace "horizontal" entre los distintos CI; de un tiempo al siguiente, en cada CI se constituye un enlace "vertical" de un acto elemental al siguiente, y esta "cuadrazón" [*"carroyage"*] de enlaces horizontales y verticales—que es necesario respetar durante los tiempos de extracción—constituye la historia del sistema.

FUNCIONAMIENTO

Inscripción.—Cada tiempo de inscripción correspondiente a la duración de un acto está dividido en tres partes destinadas sucesivamente a recibir las informaciones referentes a los tres factores del acto: situación de partida, acción y situación resultante; a la vez se efectúan las inscripciones en los CA.

Rememorización o extracción.—La manera más eficaz de interrogar a semejante memoria es plantear la pregunta que sigue: ¿Qué sucesión de actos complejos permite pasar de la situación compleja A (generalmente, la situación actual) a la N? Por lo general existen varios caminos, más o menos diferentes, correspondientes a los actos que unan ambas situaciones (fig. 2).

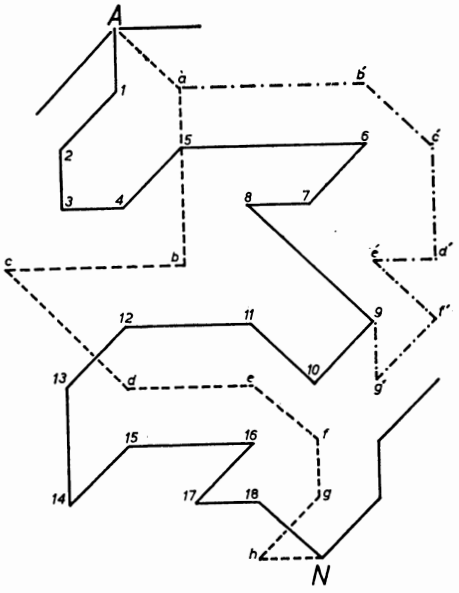


Fig. 2.

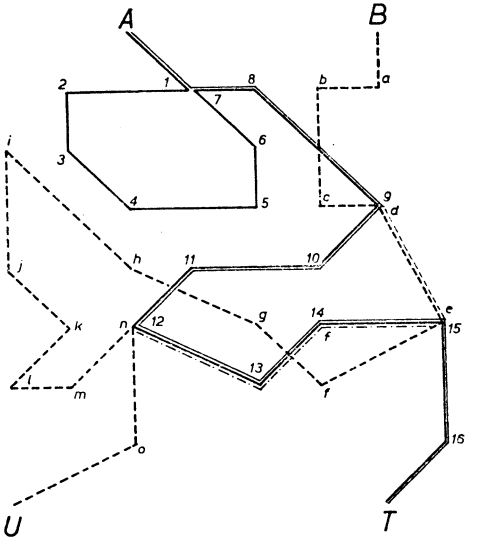
El proceso real de extracción es muy complicado, y podemos esquematizarlo así: al aplicar una tensión al elemento binario representativo de A y recogerla sobre el que represente a N, se traza eléctricamente la sucesión de transformaciones que lleven de A a N (en la práctica es preferible proceder por recurrencia, remontándose de N hasta A). Esta extracción proporciona los informes siguientes: *a*) la estrategia más corta para transformar A en N; *b*) toda estrategia en la que deba figurar obligatoriamente —o, a la inversa, en la que deba evitarse obligatoriamente— tal o cual situación intermedia; *c*) la descripción de todas las situaciones interme-

dias, y *d*) la lista y descripción por su orden de todas las acciones necesarias para la transformación aludida.

Precisemos —si es que era necesario hacerlo— que estas estrategias no son "las mejores" más que en relación con la experiencia y las dotes propias de esta memoria; no se trata de las mejores estrategias "posibles" en un sentido absoluto, que, por lo demás, tampoco sabemos cuáles son. Veremos más adelante, con todo, que esta memoria es capaz de mejorar espontáneamente —y ello en proporciones notables— los modos de actuar adquiridos por simple experiencia. Adviértase: *a*) que preguntando a un solo elemento binario se tiene inmediatamente como respuesta el conjunto de las informaciones que constituyan sus coordenadas, y que se refieren a dos situaciones y a una acción; y *b*) que no existe cronología inscrita alguna: la localización de los actos es relativa a la de otros actos, si bien un sistema captador puede, memorizando las indicaciones de un reloj, introducir jalones temporales en la cadena de actos).

APARICION DE PROPIEDADES NUEVAS

1. *Aprendizaje.*—Sea *C*1 la cadena de actos efectuados al azar que enlace una situación compleja, *A*, a otra, *T*. Si esta cadena presenta un



Aprendizaje de tipo 1 ————————
» » » » *2* – – – – – – – –
Ciclo cerrado: efghiklmn 13. 14. 15.

Fig. 3.

circuito, es decir, si pasa dos veces por una misma situación compleja intermedia (fig. 3), cuando el sistema intente por segunda vez transformar *A* en *T*, el sistema de extracción eliminará el paso por el circuito: la estrategia se habrá aligerado; es el modo de aprendizaje número 1.

Sea *C*2 otra cadena de actos que enlace *B* con *U* e interseque a la cadena *C*1 en dos puntos (esto es, al nivel de dos situaciones), 9*d* y 15*e*. Toda estrategia que tienda a transformar *A* en *T* tendrá desde entonces en adelante que elegir entre los dos caminos que enlazan 9*d* y 15*e*, y el camino que se adopta es el más corto, con lo que la estrategia se simplifica de nuevo: es el modo de aprendizaje número 2.

2. *Creación de engramas.*—Esta memoria está sujeta a cometer errores, pero éstos son fructíferos (lo cual constituye, incluso, una de sus propiedades principales). Expliquémonos.

Sean dos actos complejos formados respectivamente por los actos elementales siguientes, que estén contenidos en seis centros de integración:

a: A — B — C — D — E — F.
b: G — B — H — I — E — J.

Puede verse que tienen en común dos actos elementales, *B* y *E*, situados en CI no contiguos (fig. 4).

En determinados casos, durante el período de extracción pueden "cons-

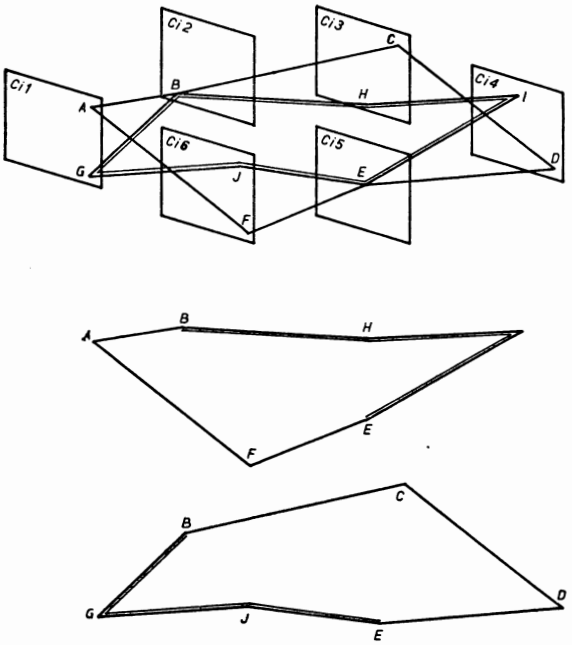


Fig. 4.

truirse" los actos complejos siguientes, que no se habían memorizado anteriormente:

$$c: A — B — H — I — E — F$$
$$d: G — B — C — D — E — J.$$

actos que, por consiguiente, se imaginan. En este momento pueden ocurrir dos cosas.

Este acto complejo sintético no puede integrarse en la experiencia de la memoria, esto es, no encuentra un lugar en la cuadrazón de las relaciones entre elementos; es el caso más frecuente, y el sistema de extracción lo elimina, pura y simplemente.

Puede ocurrir, por el contrario, que se integre perfectamente en la experiencia de la memoria: ésta puede atribuirle una evolución ficticia en conformidad con sus informaciones anteriores, y puede resultar compatible con las leyes del medio del sistema; la transformación de semejante acto puede hacerse (en la memoria) de tal modo que se llegue a un acto complejo real.

Este proceso corresponde a cuatro eventualidades:

a) *Intuición.*—El acto es realmente posible, e incluso susceptible de ser realizado ulteriormente por el sistema (que, simplemente, no tenía experiencia de él): el sistema ha tenido la intuición de la existencia del acto aludido.

b) *Invención.*—Las dos situaciones que caracterizan al acto no existen en el medio del sistema, pero éste, aplicando la estrategia indicada por la memoria, se encuentra capacitado para hacer aparecer en el medio una u otra de aquéllas: así ha inventado y realizado su invención.

c) *Ideal.*—Las situaciones mencionadas, aun cuando no son incompatibles con las leyes del medio, ni existen ni pueden ser creadas. Sin embargo, el sistema puede buscarlas: persigue, pues, un ideal.

d) [*Proceso*] *imaginario.*—En casos muy particulares, las situaciones no son compatibles con las leyes del medio, no obstante lo cual pueden introducirse en la memoria y evolucionar en ella sin causar ningún bloqueo. Debido a ello estas situaciones imaginadas crean en la memoria relaciones inesperadas entre actos que aparentemente carecían de enlace, y sirven de cadena intermedia dentro de una cadena creada por ellas (que enlaza aquellos actos). Así se constituye una vinculación aparentemente lógica —o, al menos, no contradictoria— entre dos actos sin correlación posible por otros medios: el sistema ha construido un "[proceso] imaginario".

Entiéndase bien que no hay nada en estas deducciones que autorice a invocar la emergencia de conciencia alguna, problema que es pertinente con otra categoría de simuladores. Aquí se trata, simplemente, de posibilidades combinatorias que hacen aparecer determinadas propiedades del pensamiento. (Y puede que a este respecto haya que revisar alguna escala de valores.)

3. *Capacidad de recepción ilimitada.*—Hemos visto por qué las matrices de elementos binarios efectúan la recensión de todas las combinaciones posibles de información; igualmente, en los centros de asociación se recensionan todos los tipos de correlación entre centros de integración, y, por fin, en cada CI existen todos los enlaces temporales. Así pues, no se puede concebir un acto que, por una parte, no tenga su lugar en semejante memoria y, por otra, que no tenga establecidas relaciones con el acto que le haya precedido y con el que le suceda.

Cualquiera que sea la duración de funcionamiento de este sistema, su memoria acogerá indefinidamente las informaciones sucesivas. Es evidente que dos actos idénticos no se diferenciarán en el tiempo, puesto que el mismo elemento binario servirá de soporte a ambos; pero cuando el segundo de ellos se produzca, establecerá enlaces nuevos entre tal elemento y otros elementos nuevos, que dependerán del nuevo "contexto" (enlaces diversos que caracterizan el hecho de que tal acto se haya repetido varias veces). En caso contrario, cuando se efectúe la extracción no se revelará la existencia sucesiva de dos actos idénticos. Esto es justamente lo que sucede en la realidad biológica, en la que dos situaciones idénticas no pueden ser discriminadas más que por su contexto —y si no, aparecen las ilusiones mentales.

Subrayemos, como consecuencia lejana de esto, que si las leyes del medio se modifican, y lo hacen demasiado a menudo, los enlaces entre elementos se multiplican y el contenido de la memoria se vuelve inutilizable: cualquier cosa parece poder acontecer, y la memoria, a imagen de su universo, se vuelve irracional, absurda, incoherente.

SIGNIFICACION PROFUNDA DE LOS CONJUNTOS DE ELEMENTOS

En una memoria de esta índole, gran cantidad de elementos binarios están destinados a no ser utilizados. En algunos casos, como en un dispositivo de traducción automática, por ejemplo, en el que el contenido de la memoria ha de evolucionar poco, los CI serían verdaderos diccionarios casi inmutables, y se excluirían, por construcción, la mayoría de los elementos destinados a permanecer en la posición 0.

En el caso general, lo que da toda su significación a los elementos que hayan caído a la posición 1 es la presencia, aparentemente inútil, de los numerosos elementos destinados a mantenerse en el estado 0. Y, por lo demás, no se sabe de antemano cuáles están destinados a pasar al otro valor y cuáles no llegarán a hacerlo.

Esta superabundancia de elementos permite que el sistema funcione correctamente cualesquiera que sean las leyes del universo en el que se lo sumerja: aquí no tratamos de construir una máquina de comportamiento prefabricado, programado con vistas a este o aquel medio, sino

que pueda adaptarse (salvo destrucción) a todas las circunstancias. En lo cual encontramos de nuevo una propiedad de los sistemas biológicos más evolucionados (no se trata de homeóstasis, pues ésta es una función secundaria para el sistema nervioso central).

Por otra parte, en la teoría de la información no se llama la atención suficientemente sobre el hecho de que lo que importa no es la información que se reciba (la materialidad del mensaje), sino que lo realmente significativo es que la llegada del mensaje afirma la no existencia de todas las demás posibilidades: si el "código" que se use no tiene más que dos elementos, el único valor posible de un mensaje es el de negar una posibilidad, y si posee mil elementos, la llegada del mensaje niega las 999 posibilidades restantes —que es lo que constituye la verdadera significación del mensaje—. Antes de ser transmitida, la información pertenece a una especie de nube formada por cierta cantidad de informaciones posibles; una vez que ha llegado la información a aquel a quien estaba destinada (a quien sea capaz de comprenderla), la nube se ha escindido en dos grupos que se excluyen mutuamente: el constituido por esta información única para la cual el hecho potencial correspondiente se ha convertido en actual, y el de todos los otros hechos, que pasan de ser potenciales a desvanecerse en lo inexistente.

En la memoria que hemos descrito, basta la constatación de que un elemento binario se halla en el estado 1 (que, como es claro, por sí mismo no quiere decir nada) para permitir inmediatamente la extracción de cierto número de informaciones, que será directamente proporcional al número de elementos que figuren en la matriz a la que pertenezca. (Nada de lo cual, por lo demás, está en contradicción con la teoría de la información.)

En suma, este modelo de memoria se caracteriza por: 1) la concentración de una cantidad muy importante de informaciones sobre un solo elemento binario; 2) la proyección interna de la historia del sistema a lo largo de una sucesión ininterrumpida de engramas; 3) una capacidad de recepción ilimitada; 4) el predominio de la búsqueda de la eficacia en la acción sobre la fidelidad a los detalles intermedios (aprendizaje), y 5) la posibilidad de errores originales de imaginación —y, de aquí, de intuición, invención e idealización.

Esta memoria recibe sus informaciones —igual que sus modelos psicobiológicos— por mediación del azar, del juego y de la enseñanza; hecho por el cual las experiencias aparentemente más inútiles resultan ser, finalmente, indispensables para adquirir eficacia.

RESUMEN

Siempre es posible fraccionar el funcionamiento de un sistema activo en una sucesión de actos de estructura idéntica. Acto es el

conjunto constituido por: *a*) determinado estado del medio; *b*) la acción que el sistema emprenda sobre él, y *c*) el nuevo estado del medio que resulte de ello.

Un sistema que tenga un número finito de captadores y de efectores no puede participar más que en un número finito de actos. La memoria que describimos consta de ese mismo número de elementos binarios, y se establecen enlaces entre los actos sucesivos.

Los elementos binarios se reparten en diversas matrices, cada una de las cuales constituyen un centro de integración; éstos quedan enlazados por centros de asociación.

La memoria se estructura poco a poco, de tal modo que aparecen las siguientes propiedades: intuición, invención, idealización y creación de "[procesos] imaginarios", las cuales derivan de una propiedad, más general, de imaginar. Cuando se le asigna una meta, la memoria extrae espontáneamente de su experiencia la estrategia óptima correspondiente.

Todas estas operaciones se efectúan en un número muy reducido de conmutaciones electrónicas, y el resultado se extrae de modo casi instantáneo.

Cualquiera que sea la duración de funcionamiento y la longitud de la historia del sistema que la emplee, esta memoria es capaz de acoger todas las informaciones que le lleguen.

Notas preliminares sobre un esquema funcional del pensamiento humano

Por N. STANOULOV

El presente informe analiza ciertos rasgos y aspectos funcionales del pensamiento humano que se desprenden de trabajos conocidos —sobre la cibernética en general y la teoría de la información en particular— accesibles al autor. Hemos planteado un posible esquema funcional del proceso del pensar por medio de las generalizaciones y síntesis apropiadas, si bien el autor no pretende dar una explicación fisiológica de este proceso, el más complejo de la materia animada (de hecho, no es fisiólogo); y, a pesar de que el esquema funcional así sintetizado no contiene elementos nuevos, cree que las ideas expuestas en su informe y el enfoque del problema pueden ser útiles desde un punto de vista teorético y experimental, tanto para un examen cronológico del proceso de formación y desarrollo del aparato cerebral reflexivo en el hombre como para un estudio concreto del aparato existente.

El cerebro —la corteza cerebral, en particular— es el asiento de la actividad intelectual humana. Valiéndose de diversos métodos y dispositivos experimentales, la fisiología está tratando de asentar cuáles son los rasgos estructurales del córtex cerebral y qué vínculo existe entre las diversas estructuras y las actividades del cerebro (la finalidad funcional de las diferentes partes de la corteza). A lo largo de muchos años se han acumulado y descrito enormes cantidades de fenómenos y anomalías fisiológicos, se han sistematizado los conocimientos existentes y se han advertido debidamente las correlaciones pertinentes entre los numerosísimos hechos, así como los métodos de influir en ellas. Todo esto ayuda a discriminar y diagnosticar correctamente, y a tratar con mayor eficacia, las distintas desviaciones que se conocen con respecto a las actividades normales del cerebro; sin embargo, unas categorías orgánicas tan importantes como el mecanismo de la memoria y el de los procesos fisiológicos del pensar siguen siendo un enigma. Es probable que una de las razones de tal cosa sea la falta en el cuerpo humano —o nuestra incapacidad para detectarlas— de células nerviosas (receptores) sensibles a la consciencia misma y al proceso del pensar, así como la de las correspondientes células ejecutoras (efectores), cuya función y análisis podrían proporcionarnos

alguna información acerca de los procesos materiales específicos que se produzcan en el cerebro y en el córtex cerebral, y que serían capaces de ayudarnos a localizar sus portadores.

En los últimos años, el estudio de la actividad del cerebro ha sido objeto de otras ramas de la ciencia, tales como la cibernética y la parte de ésta que se ocupa de la teoría de la información. Como sabemos, una de las virtudes de la cibernética es el hecho de que proponga un método de estudio científico de sistemas complejos (ya sean procesos o fenómenos), incluidos los biológicos: se trata del método de las analogías y modelos cuyo funcionamiento sea isomórfico —u homomórfico— al del sistema a estudiar; la cibernética ha investigado, de entre los sistemas homomórficos e isomórficos de la naturaleza y la sociedad, aquellos cuyas manifestaciones son las mismas —con mayor o menor grado de aproximación—, independientemente de la heterogeneidad entre sus estructuras [respectivas]; así pues, el modelo isomórfico reproduce ciertos aspectos o leyes que gobiernan el fenómeno que se estudie. Por decirlo de manera figurada: una de las tareas principales de la cibernética es la de explicar el mecanismo de las acciones del ser vivo mediante estructuras modélicas, cosa que logra preparando una "diagnosis" de dicho ser valiéndose de la psicología.

Un rasgo esencial del sistema nervioso y del cerebro es el carácter señalizador de su funcionamiento, rasgo que se refiere también, de un modo general, a los reguladores fisiológicos (JONES, 1961): las señales de los impulsos nerviosos son los portadores de la variada información que gobierna la actividad del organismo y que expresa su estado y su interacción con el medio concreto en que se encuentre. En el cerebro se producen una recepción, conservación (o retención), transformación y transmisión de la información, si bien la ciencia sabe hoy muy poco sobre la manera en que esta última se desplaza por el cerebro y sobre el mecanismo de la transformación activa de los datos que penetran en los que salen. Por lo demás, se han propuesto diversos esquemas relativos al proceso del pensar

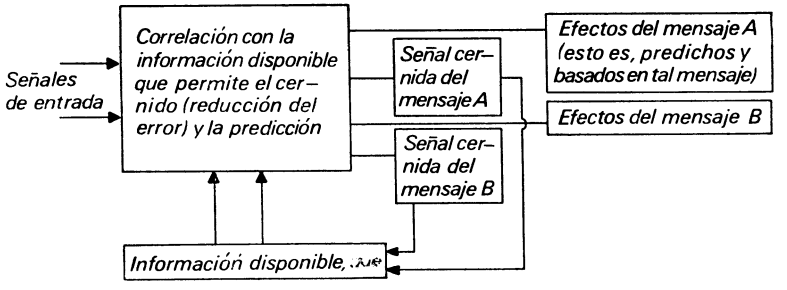


Fig. 1. Imagen de los procesos señalizadores y de las transformaciones funcionales del proceso del pensar.

en el hombre y al análisis del pensar mismo: se ha analizado aquel proceso desde el punto de vista de la teoría de la información (GOLDMAN, 1958), análisis conforme al cual presentamos aquí (fig. 1), en un esquema idealizado, una imagen muy clara de los procesos señalizadores y de las transformaciones funcionales del proceso del pensar: el homeóstato de ASHBY (1958) hace posible llegar a cierta idea acerca del funcionamiento del cerebro: el funcionamiento de su mecanismo pretende, simplemente, garantizar la conservación intacta del medio interior, y es análogo al del cerebelo de un animal; y el modelo funcional de cerebro de BLUM (1958) representa un sistema cibernético dinámico pormenorizado cuya naturaleza física se basa en el problema del equilibrio (esto es, mantenimiento) y el desequilibrio (o sea, violación) de las oscilaciones de cierto número de sistemas a base de la información aportada por el medio.

Hemos trazado el esquema funcional de flujo [*signal-flow*] (fig. 2) que sigue el proceso del pensar científico, basándonos en la teoría de la informa-

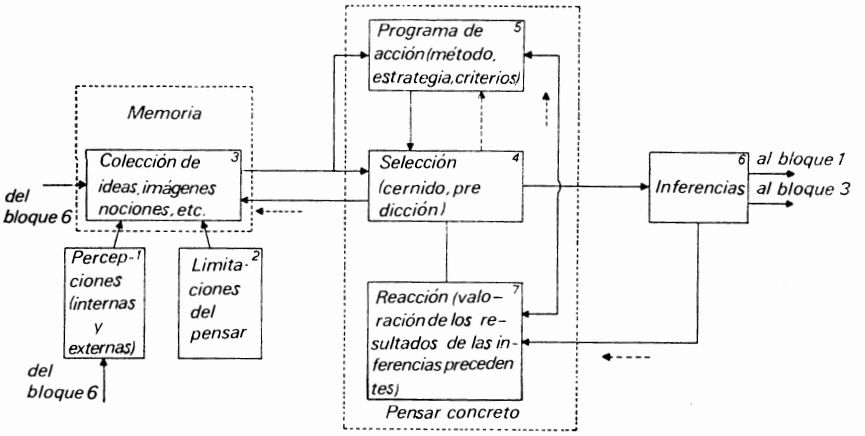


Fig. 2. Esquema de flujo del proceso del pensar científico.

ción y en ciertas ideas expuestas en la *Information Theory* de GOLDMAN (1958) y en otros lugares. Nos vamos a limitar aquí a presentar y explicar este esquema, sin detenernos en la emergencia, desarrollo y herencia, a lo largo de los muchos miles de años de la evolución de la materia animal, de los distintos elementos que forman parte de tal esquema funcional. Este incluye los siguientes bloques:

1) el de las percepciones (internas y externas):
2) el de las limitaciones del pensar;
3) el de la memoria (la colección [*assemblage*] de ideas, imágenes, nociones, etc.);

4) el de selección de la información (cernido [*smoothing*], predicción);
5) el del programa (criterios);
6) el de las inferencias, y
7) el de la reacción (valoración de las inferencias anteriores).

Las partes básicas de este esquema son el bloque de la memoria (3) y el complejo formado por los 4, 5 y 7, al que hemos dado el nombre de "pensar concreto".

El hombre se pone en contacto con su medio valiéndose de sus órganos de percepción. Las ideas, imágenes y nociones referentes a los objetos y fenómenos externos, así como a sus partes, se acumulan en la memoria durante las diversas actividades que ejercite el organismo vivo; vamos a suponer, para facilitar las cosas, que en la memoria se conservan las ideas, nociones, etc., en forma codificada, esto es, en forma de mensajes individuales constituidos por un tipo particular de señal o de un grupo de señales —asunción ésta plausible—. Asimismo se conservan en el bloque 3 otros mensajes (subconscientes, instintivos o de otra índole) isomorfos con percepciones internas. Por lo demás, la mayoría de los mensajes que se conservan en la memoria están sometidos a gran cantidad de limitaciones, cuyo origen se encuentra en limitaciones probabilitarias y lógicas, así como causales y funcionales, en determinadas regularidades, disposiciones, etc.; y de ellas, unas son isomorfas con las limitaciones existentes en el medio —como ocurre con las causales y funcionales— y otras se van formando en el proceso de la praxis humana (relacionada con la probabilidad y el conocimiento, tal como el lenguaje escrito y hablado). Desde luego, cuando el hombre reflexiona sobre un problema determinado, se ocupa durante cierto lapso de tiempo de alguna subcolección concreta de mensajes, aun cuando ello no altera la comunidad de enlaces entre los bloques 1, 2 y 3; y tampoco tiene importancia, en este caso, la forma en que se retengan en la memoria los diversos mensajes. El bloque 3 es un generador de mensajes *sui generis,* y al efectuar la colección de un número prácticamente infinito de ellos se convierte en un verdadero generador de ruido. La función del bloque 4 —que está en contacto constante con el 3— durante el proceso del pensar consiste en *seleccionar* un mensaje, o una combinación de ellos convenientemente relacionados, de entre los muchos existentes en 3, y transmitirlo al bloque de salida, esto es, el 6. Si no estamos equivocados, el concepto de función —o capacidad— de selección ha sido introducido por ASHBY (SHANNON y MCCARTHY, 1956); por decirlo con las palabras de su autor, no es imposible que lo que llamamos "facultades mentales" sea equivalente a "facultad de realizar una selección idónea" (ASHBY, 1959), y de ahí que la facultad de seleccionar un mensaje determinado o una combinación de mensajes sea un proceso de atenuación temporal de ruido (el formado por todos los demás mensajes). Esta función mental está adscrita, por una parte, al bloque 5 (como sucede en

el caso del programa-plan de selección, de los datos iniciales, el método científico, la estrategia y otros), que está conectado con los 3, 1 y 2, respectivamente, y asimismo, en gran número de ocasiones, con ciertas experiencias, con los estados afectivos, la experiencia adquirida y la capacidad necesaria para utilizar ésta. Conviene no excluir la posibilidad de que —al menos en sus líneas principales— el contenido del bloque 5 venga dictado desde el 4 (véase la línea de puntos del esquema); y es igualmente evidente que la ausencia de aquel bloque, a su vez, transformaría la función de selección en una generación de mensajes, es decir, convertiría en superfluo el 4, ya que en tal situación sus funciones serían iguales a las del bloque 3 (por otra parte, la función de selección se ve afectada por las inferencias anteriormente hechas a través del bloque 7). Se ha podido asentar que una inferencia concreta puede ir acompañada de la toma de una decisión (ejecución de una reacción, por ejemplo, de tipo muscular), caso en el que el bloque 6 está conectado, necesariamente, con el de percepciones externas, 1, y puede asimismo no verse acompañada de ninguna toma de decisión; en este último caso se tiene solamente un análisis y evaluación mentales de la inferencia, y el bloque 6 no se encuentra conectado con la memoria. Por consiguiente, y para expresar todo esto en el lenguaje de la teoría de la información, el bloque 4 lleva a cabo también lo que se conoce con el nombre de predicción, esto es, la función de selección (de la inferencia siguiente) se encuentra afectada por la valoración de las inferencias precedentes (reacción correspondiente a ellas). Ambos tipos de inferencia son absolutamente indispensables para el hombre (la primera parece estar ligada más estrechamente a la existencia del organismo, y la segunda a sus actividades intelectuales), y, sin embargo, su trascendencia ha variado mucho durante los diversos estados de desarrollo de la humanidad: la ejecución de reacciones tenía una importancia vital para el hombre primitivo, en tanto que hoy, sobre el trasfondo de una automatización creciente de los procesos industriales, lo que goza de prioridad es la "ponderación de hipótesis sin tomar decisiones" (POLETAYEV, 1960). Los bloques 5 y 7 están conectados en los dos sentidos, pues las reacciones se producen apoyándose en el plan de actividades mentales que se haya adoptado, y éste, a su vez, puede sufrir ciertas modificaciones o correcciones de acuerdo con la información de que se disponga en el bloque 7 (en el esquema presentado en la figura 2 hemos marcado el canal de realimentación o retroacción por una flecha de puntos). En su esencia, las inferencias (bloque 6) constituyen una tramitación de la información contenida en los mensajes mentales —que estaba almacenada en la memoria— valiéndose del complejo del "pensar concreto".

El esquema funcional que acabamos de describir del proceso del pensar en el hombre consta de bloques cuyas funciones pueden ser reproducidas en la práctica (con mayor o menor detalle), dado el estado actual de la tecnología. Y, en realidad, no es difícil reconocer en los bloques

aislados del esquema las conocidas unidades de una máquina calculadora, si bien conectadas de cierto modo específico; por ejemplo, en lo que respecta a las computadoras digitales, los bloques 1 y 2 representan la unidad de entrada juntamente con los datos iniciales, el bloque 3 es la unidad de almacenamiento; el 4, un tipo determinado de unidad aritmética (que sistematice la información de entrada); el 5, los programas de funcionamiento; el 6, la unidad de salida juntamente con la información (tramitada) que salga, y el 7 es la unidad de regimiento; en el caso de una computadora analógica, el bloque 3 puede ser un generador de ruido (una válvula generadora de ruido, por ejemplo), mientras que el 4 será, acaso, una combinación de filtros eléctricos convenientemente sintonizados; y análogamente cabe comparar este esquema a una máquina que rija un proceso industrial complejo.

Los bloques 4, 5 y 7 pueden presentar considerables dificultades para la realización de un modelo del proceso del pensar, en especial el 4, pues su realización precisaría que se respondiese a las preguntas siguientes: ¿cuál es la selección óptima?; ¿qué es lo que determina su univocidad?; ¿cómo podría separarse eficazmente la señal del ruido del bloque 4 en caso de que se tenga una superposición no lineal de una y otro?; ¿son independientes o no las distintas selecciones?, etc. Mas como estos y otros problemas de la misma índole han sido estudiados pormenorizadamente (GOLDMAN, 1958), no necesitamos detenernos aquí en ellos.

Puede oponerse la objeción de que hemos propuesto un modelo estrictamente definido para explicar un proceso fisiológico de carácter estadístico (MOLES, 1958); es cierto que una interrupción de la actividad de uno cualquiera de los bloques del esquema funcional que hemos descrito (de los 3, 4, 5 y 7 muy en especial) repercutiría apreciablemente en el funcionamiento del todo, mientras que, por el contrario, la destrucción de incluso la mitad de la cantidad total de las células del cerebro —que, según suele asumirse, llega a unos 20.000 millones— no afectaría en forma apreciable ni la calidad ni la cantidad de las actividades mentales (MOLES, 1958). La notable facultad que posee el cerebro (que está compuesto de miles de millones de células) de actuar con precisión pese a perturbaciones o errores incidentales de cada una de ellas puede interpretarse, en gran medida, cuando se toma en serio la aserción de que —al menos en lo que se refiere a las manifestaciones intelectuales más elevadas— no *existen en* él (o en la corteza cerebral, más en concreto) campos funcionales algunos estrictamente definidos e invariables, sino un gran número de estructuras nerviosas que son réplicas unas de otras e intercambiables y que están vinculadas de muchas formas distintas con las funciones que realicen. Como es natural, podría suponerse que cada bloque del esquema funcional descrito posee el número suficiente de réplicas para que a la interrupción de una cualquiera de ellas siga la inclusión de una de las que estén en reserva, sin que se produzca, aparentemente, ninguna perturbación del

funcionamiento del esquema en conjunto; mas una complicación de este tipo no afecta al funcionamiento del esquema en modo alguno, si bien hace que el modelo propuesto se asemeje más, también en sentido estructural, al proceso del pensar.

Difícilmente, por lo demás, podría agotar el esquema indicado la totalidad del agregado de enlaces que existen o pueden existir entre los distintos bloques funcionales: basta indicar, como ejemplo, que, de hecho, el bloque 5 está ligado indisolublemente al 2 e incluso podría formar parte de él, y que ambos bloques constituyen una parte de la memoria (no obstante lo cual, el modo de conexión que hemos adoptado pretende presentar con claridad la dinámica del esquema general); y esta compleja interconexión entre los diversos bloques parece confirmar, al menos en principio, la intercambiabilidad y facultad de poseer réplicas que es típica del funcionamiento de las distintas estructuras nerviosas arriba mencionadas.

Desde luego, el estudio del esquema descrito no puede constituir un fin en sí mismo: ha de llevarse a cabo siguiendo muy de cerca el proceso del pensar en el hombre, y tiene que servir a la finalidad de explicarlo; lo cual, sin embargo, requiere que se resuelvan diversos problemas dificilísimos (de los cuales hemos mencionado algunos brevemente). Uno de los problemas fundamentales que se encuentran cuando se pretende desvelar el mecanismo del pensar es el de descubrir los métodos de codificar la información en el cerebro y de distribuirla por la corteza cerebral, cosa a la que pueden ayudar del modo más natural y directo las investigaciones encaminadas a resolver problemas tan importantes como el de explicar el mecanismo del funcionamiento de la gran variedad de reguladores fisiológicos existente en los organismos vivos y los intentos de simular (mediante modelos puramente técnicos o valiéndose de métodos combinados) los procesos nerviosos y cerebrales de los animales y del hombre.

Es innecesario decir que todo modelo que pretenda explicar algunos aspectos del proceso del pensar en el hombre puede utilizarse en gran número de distintos experimentos e investigaciones en muchos campos de la ciencia humana: todo depende de cómo se elijan los bloques 2, 3 y 5 (pues los demás bloques del esquema pueden considerarse comunes, al menos en la mayoría de los casos). Unos pequeños reajustes del esquema pueden ser de utilidad para la explicación de ciertos fenómenos que se encuentran en el campo de la medicina, pero así nos saldríamos fuera del alcance de la presente comunicación.

RESUMEN

La cibernética y la teoría de la información se están aplicando a ciertos procesos del pensamiento humano. Basándonos en esta aplicación, proponemos un esquema de flujo de la realización de la acti-

vidad mental científica, esquema que consta de unos bloques funcionales convenientemente conectados entre sí por cadenas directas y de realimentación. El esquema funcional propuesto puede ser utilizado para proyectar y estudiar mediante modelos tanto investigaciones científicas como silogismos y modos de resolver diversos problemas de medicina, matemáticas, ingeniería, etc.

REFERENCIAS BIBLIGRAFICAS

ASHBY, W. ROSS (1958): L'homéostasie. *L'ère atomique*. Ginebra, René Kister, *8*, 121-123.

ASHBY, W. ROSS (1959): *Introduction to Cybernetics*. Londres, Chapman and Hall [versión castellana: *Introducción a la cibernética*, Buenos Aires, Nueva Visión, 1960].

BLUM, G. (1958). Modèle des fonctions cérébrales. *L'ère atomique*. Ginebra, René Kister, *8*, 126-127.

GOLDMAN, S. (1958): *Information Theory*. Londres, Constable and Co.

JONES, V. W. (1961): Certain properties of physiological regulators. *Proceedings 1st International Congress of I.F.A.C., 2*, 950-961 (en ruso).

MOLES, A. A. (1958): La cybernétique est une résolution secrète. *L'ère atomique*. Ginebra, René Kister, *8*, 5-9.

POLETAYEV, J. A. (1960): *La señal: sobre ciertos conceptos de la cibernética*. Sofía, Editorial Tehnika (en búlgaro, traducido del ruso).

SHANNON, C. E., y MCCARTHY (1956): *Automata Studies*. Princeton, University Press.

Histología, histonomía, histo-lógica

Por V. BRAITENBERG

Es muy probable que en la *Histología del sistema nervioso* de CAJAL (1911) se encuentre más información acerca de los cerebros animales que en ningún otro texto de neurología (excepto, tal vez, la *Neurología comparativa* de ARIËNS KAPPERS, 1920). Advertimos, sin embargo, tres hechos sorprendentes referentes a aquella obra: *a*) su información es en gran medida independiente de la investigación fisiológica contemporánea, ya que a las pormenorizadas descripciones de CAJAL sobre la histología de muchos tipos de sustancia gris no corresponden análisis fisiológicos igualmente detallados que pudieran emparejarse con ellas; *b*) por muy rica que sea en pormenores, tal obra es, en realidad, un bosquejo panorámico de una inmensa variedad de estructuras neurológicas, y difícilmente contendrá la respuesta a ninguna pregunta particular acerca de una estructura determinada de una especie determinada de animales, y *c*) en ella se encuentran figuras fiables, pero está casi enteramente desprovista de indicaciones cuantitativas.

Teniendo en cuenta estos hechos, es fácil predecir que el desarrollo futuro de la ciencia del cerebro tendrá que incluir un volumen mucho mayor del tipo de histología ejemplificado por CAJAL y que, siempre que sea posible, habrá que reemplazar la mole de descripciones histológicas por unas reglas estructurales cuantitativas y más manejables; se trata de una tendencia que vinculamos a los nombres de BOK (1959), que la tituló "histonomía", y SHOLL (1956), el primero —que yo sepa— que presentó unas mediciones de la "conexión neuronal" en una forma idónea para su aplicación inmediata a los modelos matemáticos de la función nerviosa (BEURLE, 1954a *y* b; UTTLEY, 1955).

Otra predicción, que constituye el nervio de esta comunicación y refleja el programa de nuestro laboratorio, se refiere a la elaboración de enlaces mucho más estrechos entre las descripciones "histonómicas" de las redes nerviosas y los testimonios electrofisiológicos. Yendo mucho más allá de la difundida actitud del neurofisiólogo que emplea técnicas microscópicas y un atlas histológico únicamente para cerciorarse de la posición de los electrodos y, en consecuencia, para asociar el nombre de una estructura con el de un epifenómeno eléctrico, nosotros andamos tras un método

de traducir directamente las descripciones estructurales de las redes nerviosas en esquemas funcionales y, de aquí, en posibles *explicaciones* de las estructuras neurológicas como "máquinas" lógicas especializadas.

Es de temer que semejante programa ofenda a dos *idola tribus* distintos de las ciencias biológicas. Por lo pronto, sustituye la observación de las estructuras existentes y su interpretación en forma funcional por la experimentación fisiológica directa; es un tabú biológico —fundado en una serie perfectamente documentada de conjeturas erróneas en varios campos de la biología— el no inferir la función de la estructura. En el caso concreto del sistema nervioso podemos señalar, sin embargo, que una gran parte de los experimentos activos que efectuamos sobre el cerebro, que involucran la estimulación eléctrica con electrodos bastante macroscópicos, revelan hechos de un orden de magnitud varias veces mayor que la complejidad combinatoria sugerida por la imagen histológica, y que esto puede constituir durante algún tiempo una dificultad insuperable para la neurofisiología (al menos en lo que a las redes nerviosas centrales se refiere, que no pueden alcanzarse fácilmente mediante una estimulación periférica que dominásemos enteramente). Y debido a esta diferencia en la finura de la definición, si bien proponemos, en absoluto, que se efectúen análisis cibernéticos de las redes nerviosas centrales, es plausible que durante cierto tiempo sea la histología quien sirva de guía.

El otro ídolo es más grave. Cabe tomar una interpretación funcional de cierta estructura histológica como *explicación* de ella, lo cual sería, como es obvio, una explicación teleológica. Su estudio metodológico general es muy sencillo, puesto que toda explicación teleológica de una configuración biológica observada se convierte en una explicación causal cuando se le antepone la razonable hipótesis de la evolución darwiniana, que converge hacia unos organismos de funcionamiento óptimo; pero en la práctica nos damos cuenta del evidente riesgo de confundir residuos evolutivos o ciertas consecuencias de necesidades embriológicas o mecánicas con indicaciones de alguna función concreta. Sin embargo, cuando uno se enfrenta con la estupenda variedad de la neuroanatomía muy pronto se le agotan las explicaciones "mecánicas" triviales, y bien podemos emplear la "apuesta de trabajo" de que lo que ganemos aplicando nuestro método pesará más que los errores que hayamos de cometer.

En caso de que fuese necesario dar una respuesta a los críticos que proponen que en neuroanatomía se den explicaciones embriológicas preferiblemente a las teleológicas, yo señalaría las diferencias que hay entre los tres grandes tipos de córtex de los vertebrados, el palio, el *tectum* [*opticum*] y el [del] cerebelo: el primero está principalmente constituido por las "células piramidales", sumamente características y de tamaño muy variable, que tienen los extremos alineados con respecto a la superficie de la corteza; el segundo, del *tectum,* está formado, sobre todo, por neuronas que alcanzan desde la superficie hasta el fondo y que se ramifican en unas pocas capas

especiales, y el tercero, del cerebelo, posee una simetría reticulada enormemente característica, en la que todas las fibras de salida proceden de neuronas de Purkinje, que son iguales entre sí, excepto en cuanto a la posición. Pues bien, parece extremadamente improbable que podamos explicar todo esto con una mera invocación de principios de la mecánica del crecimiento; y, de todos modos, yo pediría al crítico que explicase por qué las dendritas de la oliva bulbar y las del núcleo dentado se ramifican formando esferas muy regulares, mientras que en la sustancia reticular parecen llegar todo lo más lejos posible; por qué las fibras aferentes del núcleo interpeduncular serpentean varias veces del extremo derecho al izquierdo del mismo, etc.

METODO

Proponemos el método que sigue para el análisis funcional de la estructura de la sustancia gris. Elijamos primero un fragmento de ésta que pueda reconocerse fácilmente —esto es, por su posición con respecto a otras partes— en varias especies (las "cortezas" altamente especializadas del cerebro de los vertebrados, tales como el córtex cerebral y el cerebelar, el *tectum opticum* o la retina, parecen ser muy prometedoras, debido a lo que se repite su estructura y a las considerables diferencias que las separan, que, según creemos firmemente, indican unas diferencias funcionales esenciales); una vez definida tal estructura en varias especies, observaremos sus diferencias interespecíficas, así como sus variaciones locales internas (v. gr., las áreas del córtex), en oposición a las características que sean constantes por toda la estructura del caso y en todas las especies; podremos combinar tales rasgos invariantes en una descripción que, suponemos, reflejará el esquema funcional general de la estructura que sea; y lo primero que hemos de entender es semejante esquema.

A continuación puede introducirse un conjunto de postulados, tomados de los testimonios fisiológicos directos sobre las neuronas aisladas y que se refieran a detalles estructurales que puedan reconocerse fácilmente en la imagen histológica. Así, podemos suponer que las dendritas conducen la excitación atenuándola progresivamente, que los axones lo hacen sin atenuación y con velocidad proporcional a su grueso, que la transmisión excitadora se produce de las dendritas al axón dentro de la neurona y de la terminación axonal a aquéllas entre una neurona y la siguiente, etc. Por desgracia, en este diccionario histo-fisiológico hay varias lagunas (que hemos de suplir con asunciones arbitrarias), de las cuales la más importante es la imposibilidad de distinguir histológicamente las conexiones inhibidoras de las excitadoras. (Para un debate de este método general y del "diccionario", véase BRAITENBERG, 1961a).

ENSAYO CON EL CORTEX

Hemos estudiado con anterioridad el caso de la *corteza cerebelosa*, y lo hemos presentado en el primer congreso de cibernética médica (BRAITENBERG, 1961b; BRAITENBERG y ONESTO, 1960). Ciertas suposiciones fisiológicas plausibles, juntamente con los testimonios histológicos, nos permiten traducir la estructura de la capa molecular del cerebelo en un esquema funcional que representa un reloj (en el sentido de que traduce distancias en intervalos temporales, y viceversa); resultado alentador en cuanto que la interpretación funcional proporciona por sí misma una explicación teleológica de los detalles más destacados de la estructura cerebelosa —en realidad, de los rasgos anatómicos comunes a los cerebelos de todas las especies de vertebrados.

La capa molecular del cerebelo es un objeto particularmente afortunado para nuestros fines, puesto que podemos dar una "explicación" con independencia de la índole excitadora o inhibidora de las sinapsis que en él se encuentran, ya que las relaciones temporales constituyen el rasgo más sobresaliente. En la mayoría de los demás casos nos resentimos de un modo mucho más grave de nuestra ignorancia acerca de esta cuestión fundamental; mas, con todo, cabe decir *algo* acerca de una estructura de relaciones lógicas incluso si no podemos decidir si una relación está representada por cierta función lógica o por su complemento.

Una abstracción de segunda mano de la corteza cerebral (BRAITENBERG y LAURIA, 1960).

CAIANIELLO (1961) ha introducido la ecuación

$$u_h(t+\tau) = 1\left[\sum_{k,r} a_{hk}^{(r)} u_k(t - r\tau) - S_h\right]$$

en la que la función $1(x)$ se define así:

$$1(x) = \begin{matrix} 1 \text{ para } x > 0 \\ 0 \text{ para } x \leqslant 0 \end{matrix}$$

para representar de una manera muy flexible la dependencia mutua de elementos de "todo o nada", tales como neuronas.

Lo que querríamos tener es, para dos neuronas cualesquiera de un trozo de sustancia gris, representadas por las funciones $u_h(t)$ y $u_k(t)$, una medida de sus coeficientes de acople, $a_{hk}^{(r)}$ y $a_{kh}^{(r)}$, que serán diferentes, en general; dicho de otro modo, necesitamos una medida de la excitación que se transmita de una neurona a la otra; medida que puede ser positiva o negativa, y que esta última situación representa un fenómeno de inhibición.

En el caso de la corteza cerebral, el registro directo con microelectrodos no ha proporcionado hasta ahora ninguna indicación sobre el valor de

tales coeficientes ni de su dependencia del tiempo (debida a la atenuadora conducción por las dendritas), teniendo en cuenta la cual se ha introducido el supraíndice (r) en la ecuación anterior. Ni tampoco tenemos forma de medir directamente los umbrales, S, que tienen que superar las excitaciones al llegar a las neuronas.

Por consiguiente, parece deseable que extraigamos de la anatomía algu-

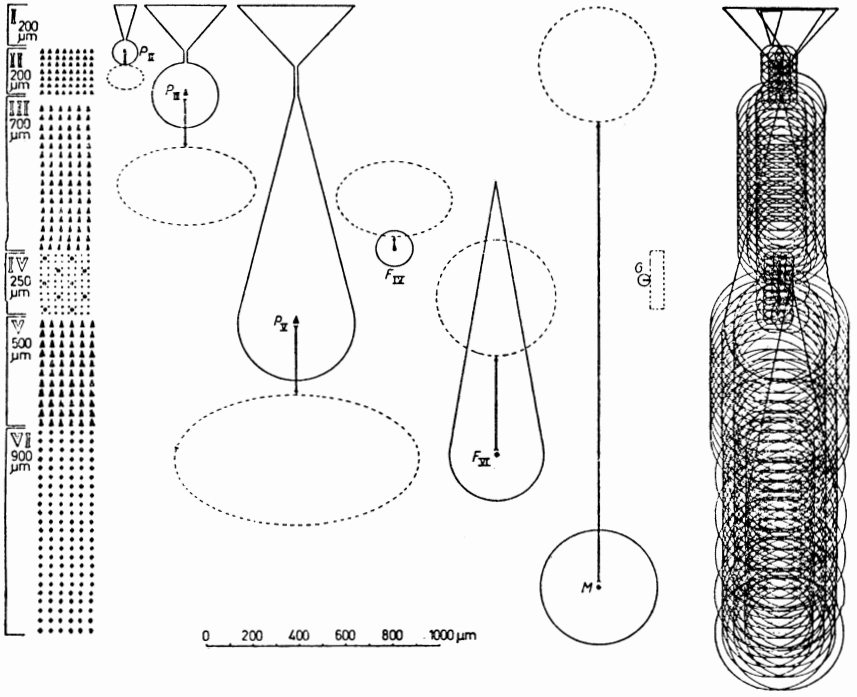


Fig. 1. Abstracción histológica utilizada para calcular los coeficientes de acople entre neuronas corticales. *A la izquierda:* distribución de los cuerpos celulares de distintos tipos en las capas I a VI; hemos dibujado tales cuerpos como si estuvieran dispuestos en un reticulado cúbico; su densidad corresponde aproximadamente a la que se encuentra realmente en el córtex temporal humano. *Parte central:* P_{II}, P_{III}, P_V, F_{IV}, F_{VI}, M y G son los siete tipos de neuronas de nuestra abstracción, que pueden identificarse, por la forma de los cuerpos celulares correspondientes, con los elementos de la parte izquierda del dibujo; hemos trazado el campo dendrítico (en línea continua), el axonal (en línea de trazos) y el axón de conexión (con una flecha) de cada uno de los tipos. *A la derecha:* siluetas de los campos dendríticos de tres columnas de neuronas (la mayoría de ellas sólo representadas por circunferencias correspondientes a la región de las dendritas basales; cf. la parte izquierda de la figura), con objeto de hacer patente la importancia del solapamiento. (De BRAITENBERG y LAURIA, 1960.)

na indicación acerca de las conexiones funcionales entre las neuronas del córtex. Esta empresa podría parecer enormemente difícil si se considera el gran número de contactos aferentes y eferentes que posee cada neurona:

todas las "espinas" dendríticas * (suponiendo que cada una represente una sinapsis) y todas las ramitas más finas de la ramificación axonal de una neurona. Sin embargo, un pensamiento puede consolarnos: teniendo en cuenta todo lo que sabemos, cuando un punto de excitación llega a la corteza procedente de la periferia, lo más probable es que lo transmita un haz de fibras próximas entre sí; e, incluso si lo hace una sola fibra, quedará distribuido a modo de nube de excitación en la zona de la arborización terminal, que —también en las "aferentes específicas"— tiene un diámetro de 300 μ por lo menos (fig. 12). Dicho con otras palabras, lo único que tiene que ocuparnos son grandes *manchas* de excitación; y la descripción detallada de lo que suceda en cada uno de los contactos axodendríticos puede tener importancia para la cuestión de la memoria, pero es sumamente probable que no sea pertinente en lo que se refiere a un plano general de la corteza.

Hemos ideado, por lo tanto, el método de traducción que sigue de los datos morfológicos en coeficientes de acople; método que conduce a un modelo basto, pero que, sin embargo, es capaz de perfeccionarse en *cuanto* se disponga de datos microfisiológicos sobre las neuronas individuales y que puede, a través de un proceso de tentativas y errores, ayudarnos a fijar el valor de algunas de las constantes que por ahora no han sido determinadas.

La histología en que nos apoyamos procede de la bibliografía, principalmente de CAJAL (1911). Dibujamos para cada neurona (fig. 1) un cuerpo geométrico sencillo que encierre todas las prolongaciones dendríticas (campo dendrítico), otro en el que se encuentren las ramificaciones terminales del axón (campo axonal) y una flecha que una los dos.

Partiendo de la variedad existente de formas neuronales, abstraemos cierto número de tipos, apoyándonos en criterios fisiognómicos, y determinamos su densidad y su distribución en distintos estratos de la corteza.

Definimos como unidad de excitación la cantidad de ella, E, producida en 1 mm^3 de sustancia gris cuando llegue un impulso a cada una de las terminaciones axonales que se hallen en su interior; y suponemos que, para cada neurona de tipo T, la excitación que produce cuando se dispare, e_T, será proporcional a su tamaño, o sea, digamos, al volumen de su pericario **, v_T (medida que podemos conseguir fácilmente valiéndonos de preparaciones):

$$e_T = c\, v_T$$

---

* Son salientes muy cortos, visibles en la superficie lateral de las dendritas. *(Nota del traductor.)*

** El cuerpo celular, sin contar las prolongaciones o ramificaciones. (*N. del T.*)

Esta fórmula refleja el plausible supuesto de que el efecto causado por el disparo de una neurona pequeña es menor que el correspondiente a una grande. Si denotamos con N_T la densidad de neuronas del tipo T, tenemos:

$$\sum_T N_T e_T = \sum_T N_T c \, v_T = 1$$

lo cual nos da para el coeficiente de proporcionalidad, c, el valor

$$c = \frac{1}{\sum_T N_T v_T}$$

Expresándolo de otro modo: en la abstracción que hemos formado, la excitación que produce una neurona cada vez que se dispare es igual, en unidades de excitación, E, al volumen del pericario multiplicado por el coeficiente celular gris de Von Economo, ya que es evidente que la fracción

$$\frac{1}{\sum_T N_T v_T}$$

representa esta conocida medida neuroanatómica.

Suponemos, además, que la excitación se distribuye uniformemente por el volumen del campo axonal, A, y que una proporción $(DA)/A$ de la excitación de una neurona, e_T, pasa al campo dendrítico de otra neurona cuya intersección con el campo axonal en cuestión tenga el volumen (DA). El coeficiente de acople, a_{hk}, que representa la cantidad de excitación recibida por una neurona, u_h, cuando se dispara la u_k, se convierte en

$$a_{hk} = \frac{V_k}{\sum_T N_T v_T} \cdot \frac{(DA)_{hk}}{A_k} \cdot E$$

Podemos suponer, ademas, que los umbrales de las neuronas están en proporción de sus campos dendríticos; o sea, que representan el coeficiente de acople normalizado, $\bar{a}_{hk}$ (es decir, la densidad de excitación producida en un campo dendrítico), que es:

$$\bar{a}_{hk} = \frac{v_k}{\sum_T N_T v_T} \cdot \frac{(DA)_{hk}}{D_h A_k} \cdot \frac{E}{mm^3}$$

y vamos a suponer, sobre ello, que todos los umbrales son iguales a una constante, S.

Por muy tosco que esto pueda parecer, nuestro modelo posee la virtud de incluir una gran parte de la información que nos proporciona la histología, y por consiguiente, para las distintas estructuras, gran cantidad de las diferencias estructurales que nos gustaría poder relacionar con su especialización funcional. Los umbrales son arbitrarios, es cierto, pero acaso esto no se aleje mucho de la verdad, puesto que para toda red nerviosa

real —y para los modelos realistas (véase, por ejemplo, FARLEY y CLARK, 1961)— nos vemos obligados a postular un mecanismo regulador del umbral que mantenga la red, pese a las variaciones de la entrada, en el estrecho sendero que hay entre el ataque epiléptico y el coma *. El inconveniente más grave de nuestro esquema es que sólo atiende a valores positivos de la excitación, debido a carecer de posibilidades de inferir de la histología el signo del acople —cosa que habrá de corregirse, con el tiempo, apoyándose en observaciones fisiológicas directas—. Todas las demás constantes que necesitamos se pueden leer directamente en los datos histológicos (o, mejor, histonómicos); y en este tosco esquema hemos pasado por alto algunos otros hechos (las relaciones temporales debidas a la demora en los axones y a la conducción con atenuación en las dendritas), pero no habría dificultad en incorporarlos a él.

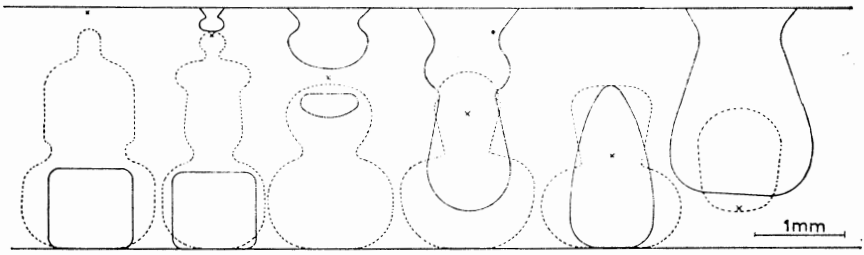


Fig. 2. (Véase la explicación en el texto.)

Las dificultades son más bien técnicas, pues los cálculos de geometría elemental que se precisan para medir, digamos, la intersección de un elipsoide de rotación con unas estructuras en forma de botella de distintos tamaños y en diversas posiciones relativas constituyen una tarea colosal. La cual podría evitarse si la distribución de las dendritas y de las terminaciones axonales de las distintas neuronas se diese en alguna forma analítica, en vez de geométrica (LAURIA, de nuestro laboratorio, ha propuesto esquemas de este tipo).

Entretanto, la figura 2 puede valernos para captar intuitivamente las conexiones de las neuronas corticales —en las formas abstractas de nuestro modelo (fig. 1)—. Para cada punto situado a cierto nivel en el espesor de la corteza (puntos marcados con cruces en el diagrama) podemos dibujar la silueta de una región (líneas continuas) que encierre todos los campos dendríticos de las neuronas cuyos campos axonales incluyan el punto dicho; tenemos así la región desde la que puede transmitirse monosinápticamente una excitación al punto dado. Y, a la inversa, podemos dibujar (en líneas de trazos) la región que encierre todos los campos axonales de las neuronas cuyos campos dendríticos incluyan el punto en cuestión, esto es,

* Véase la comunicación del profesor ASHBY a esta reunión.

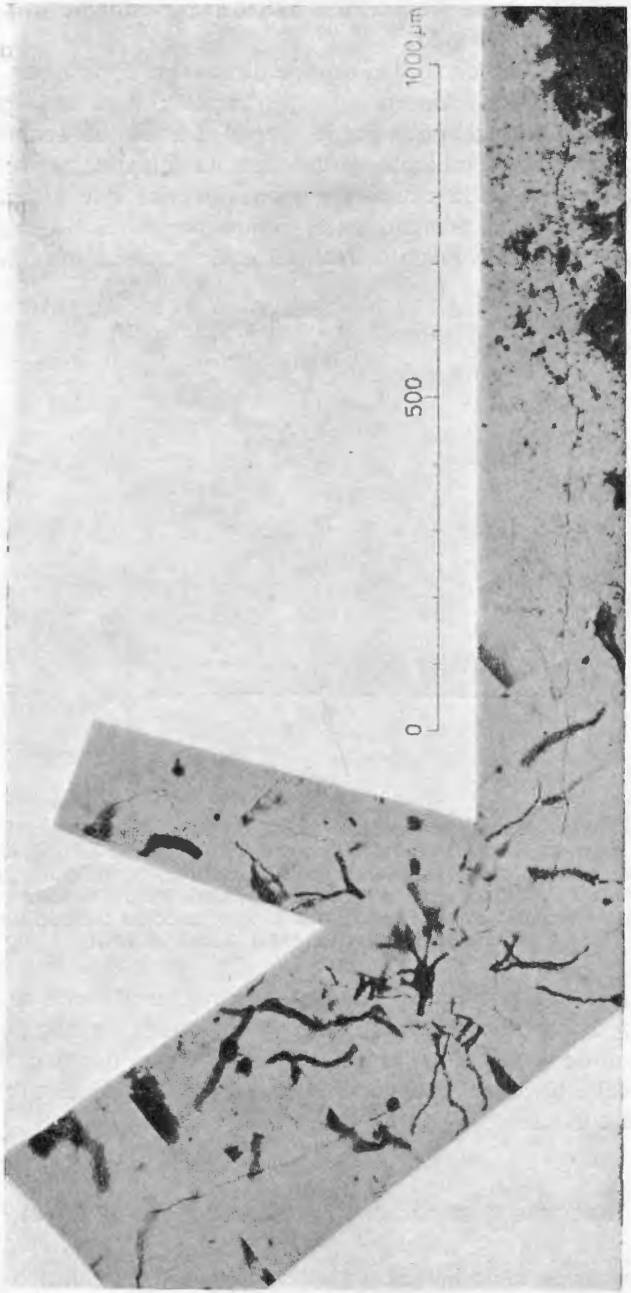
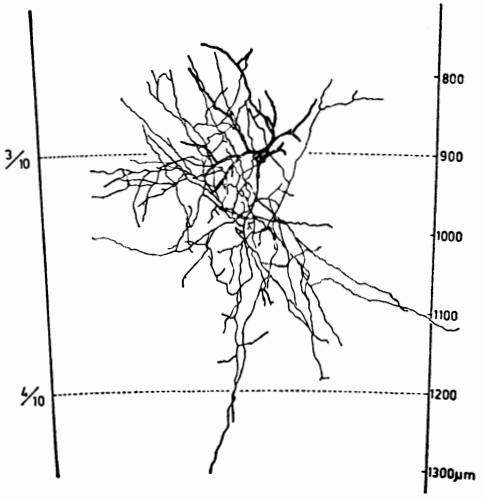


Fig. 3. Microfotografía compuesta de las ramas horizontales del axón de una célula piramidal de las capas inferiores de la corteza de *Bos taurus*. (Preparación por el método de Golgi.)

la región a la que puede transmitirse monosinápticamente una excitación provinente del punto elegido.

Podemos concebirlo como una especie de sistema óptico, pero con líneas conductoras de la excitación en lugar de "rayos": para cada punto de la corteza tenemos una región que puede "verse" a través del sistema mirando hacia atrás en el tiempo (el lapso de una demora sináptica); o sea, la región de posibles fuentes de la excitación monosináptica que alcance a aquel punto. Y mirando hacia adelante en el tiempo por el mismo orificio vemos la región a la que llegará luego la excitación. En este sistema óptico existen



Figs. 4-12. Dibujos sacados con cámara lúcida de preparaciones (por el método de Golgi) de la corteza cerebral de *Bos taurus*. Escala, 100 : 1. Las líneas situadas a derecha e izquierda son «verticales» en sentido histológico, de modo que su inclinación indica la curvatura del córtex. La profundidad dentro de éste está marcada a la izquierda en fracción de su espesor, y a la derecha como función de la distancia a su superficie (en micrones). Véase el texto.

muchas reflexiones, pues para cada punto la región aferente se solapa con la eferente; dicho de otro modo, cada punto puede formar parte de una reverberación de actividad en la que sólo intervengan dos neuronas, hallazgo que no debe olvidarse cuando se busca el sitio de los circuitos reverberantes en la corteza.

ALGUNAS OBSERVACIONES SOBRE MATERIAL DE GOLGI

Durante varios años hemos estado preparando en nuestro laboratorio un número apreciable de impregnaciones según Golgi de la corteza cerebral de *Bos taurus*; este material se aprovechará en una publicación más

sistemática, pero vamos a presentar ahora algunos ejemplos, principalmente con el propósito de examinar la abstracción arriba expuesta.

La elección del *Bos taurus,* animal que se ha seleccionado durante siglos de acuerdo con criterios todo menos intelectuales, nos ofrece la posibilidad de comparar este material con el relativamente bien conocido correspondiente al *Homo sapiens*; es de esperar que los rasgos comunes reflejen el esquema funcional básico de la corteza, en tanto que las diferencias específicas podrían apuntar al substrato de las realizaciones específicamente humanas. Uno de los peligros de las comparaciones entre los fenómenos anatómicos y psicológicos reside en el hecho de que cuando observamos nuestro comportamiento nos percatamos principalmente de los fenómenos más complejos, mientras que en la anatomía nos limitamos a estudiar unas cuantas mallas de la red total: tendemos a establecer correlaciones entre niveles de complejidad que no se corresponden. El material que presentamos del *Bos taurus* servirá de advertencia, al hacernos ver que las mallas elementales son sorprendentemente semejantes en la corteza bovina y en la humana.

La figura 3 muestra algunas ramas del axón de una célula piramidal de las capas inferiores del córtex cortada tangencialmente; esta fotografía se compone de 58 placas distintas, procedimiento exigido por la finura de las prolongaciones axonales (que precisan una buena definición) y por su gran dispersión tridimensional (que requiere mucha profundidad de foco),

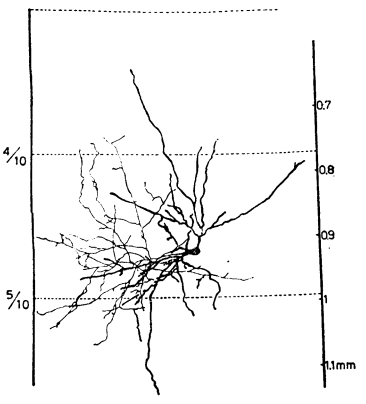


Fig. 5. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

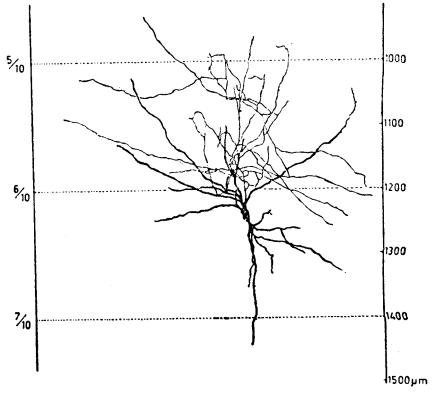


Fig. 6. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

atributos ambos que hacen de las neuronas corticales uno de los objetos menos fotogénicos imaginables. Por ello tiene uno que acudir al viejo método de dibujar con cámara lúcida (figs. 4 a 12).

Importa mucho que se advierta la escala de los dibujos, 100 : 1. Mientras que en las preparaciones con el método de Nissl nos asombra la

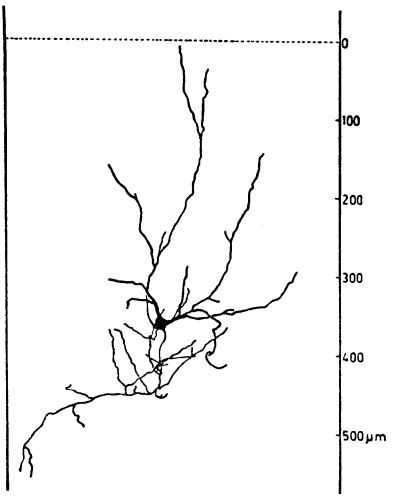


Fig. 7. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

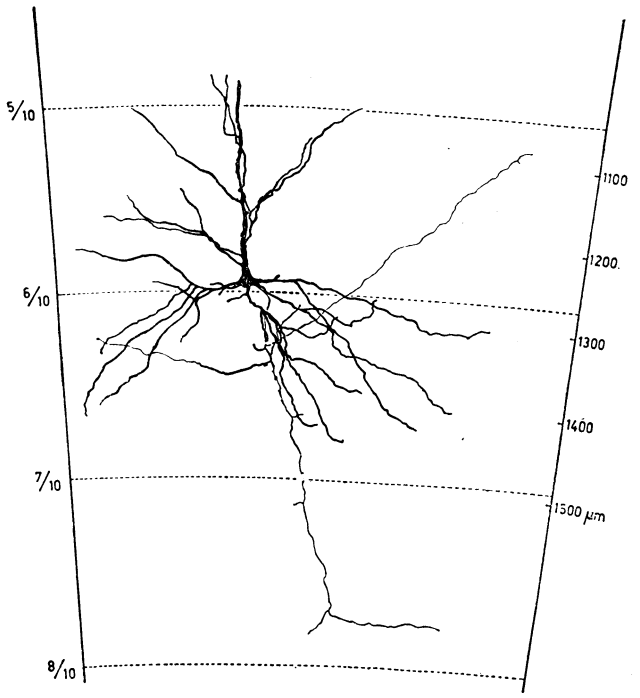


Fig. 8. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

cantidad de neuronas que hay, las imágenes obtenidas por el de Golgi tienden a sorprendernos con el tamaño de estos objetos: es muy corriente encontrar árboles tanto dendríticos como axonales del orden de 1 mm aproximadamente (en las neuronas más pequeñas, por lo menos de varios cientos de micras de un extremo a otro). Lo mismo los recuentos que las mediciones nos informan de la vasta compenetración de las neuronas, que constituye una de las características más impresionantes de la corteza cerebral; y la consideración de la corteza cerebelosa, en la que gran parte de los colaterales axonales (las fibras paralelas) son verdaderamente paralelos, y en la que las ramificaciones de las células de Purkinje dendríticas están perfectamente separadas unas de otras, nos hace darnos cuenta de que ello no se cumple en todos los tipos de la sustancia gris.

Una de las cuestiones más acuciantes suscitadas por todas las abstracciones hasta ahora propuestas de la estructura de la corteza cerebral (incluyendo la nuestra, que hemos presentado en las páginas anteriores) es la de la justificación de los distintos *tipos* de neuronas corticales. Se trata de una pregunta que exige una respuesta estadística, que sería prematura

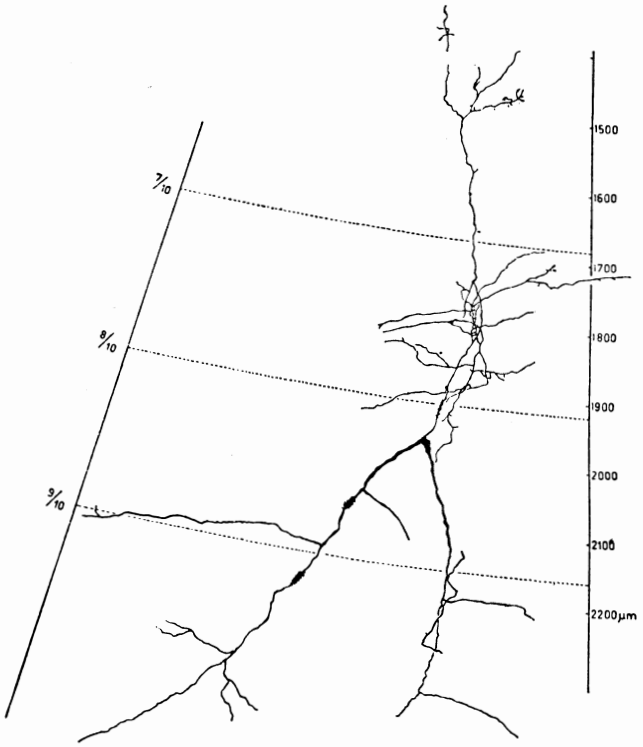


Fig. 9. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

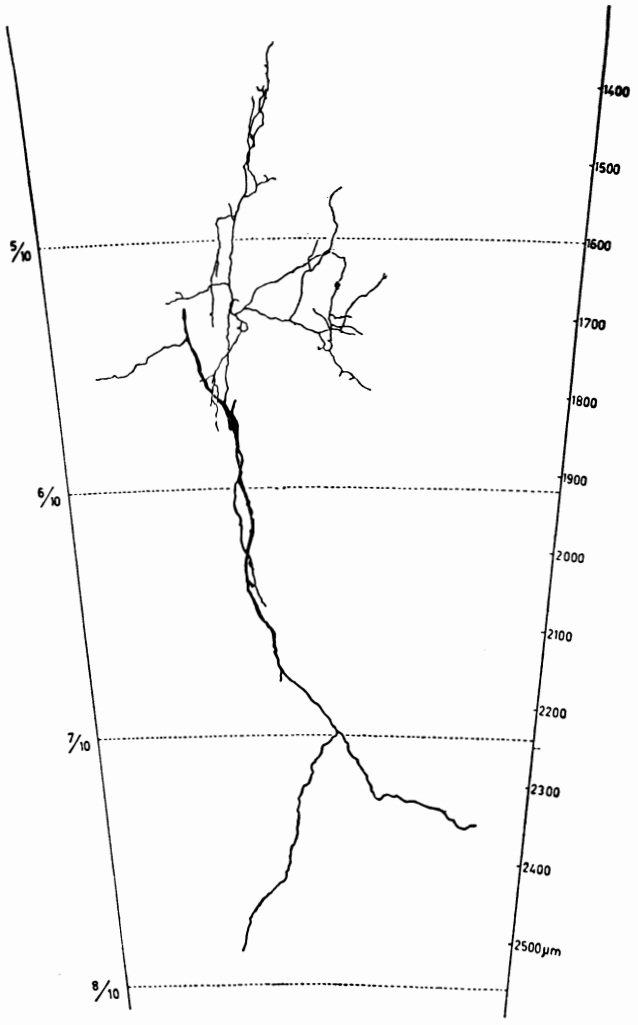


Fig. 10. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

si la basásemos en el material de que disponemos hasta ahora (unos 250 dibujos en cámara lúcida de neuronas corticales con buena ramificación axonal); pero podemos ofrecer, pese a ello, la versión preliminar que sigue.

Las neuronas que no cabe clasificar en uno de los tres tipos siguientes son muy raras en nuestro material (sólo constituyen 1/10 del total, aproximadamente).

Las neuronas pequeñas y estrelladas, es decir, células cuyas dendritas

se disponen con simetría toscamente esférica alrededor del cuerpo de la célula y están situadas a mitad del espesor de la corteza o un poco más arriba o más abajo, tienen el axón corto y ramificado muy densamente en una pequeña zona cuyo diámetro es comparable al de las ramificaciones dendríticas y se solapa fuertemente con estas últimas. Estas células forman la "capa granular", o estrato IV de la citoarquitectónica (figs. 4 a 6).

Las neuronas cuyas ramificaciones dendríticas forman una figura de simetría cilíndrica alrededor de un eje vertical, que verticalmente llega a distancias mayores que horizontalmente, tienen axones con colaterales escasos y aproximadamente horizontales: se trata, desde luego, de las conocidas células piramidales. El tamaño (incluida la longitud de los colaterales) varía con la posición del cuerpo celular a lo largo del espesor de

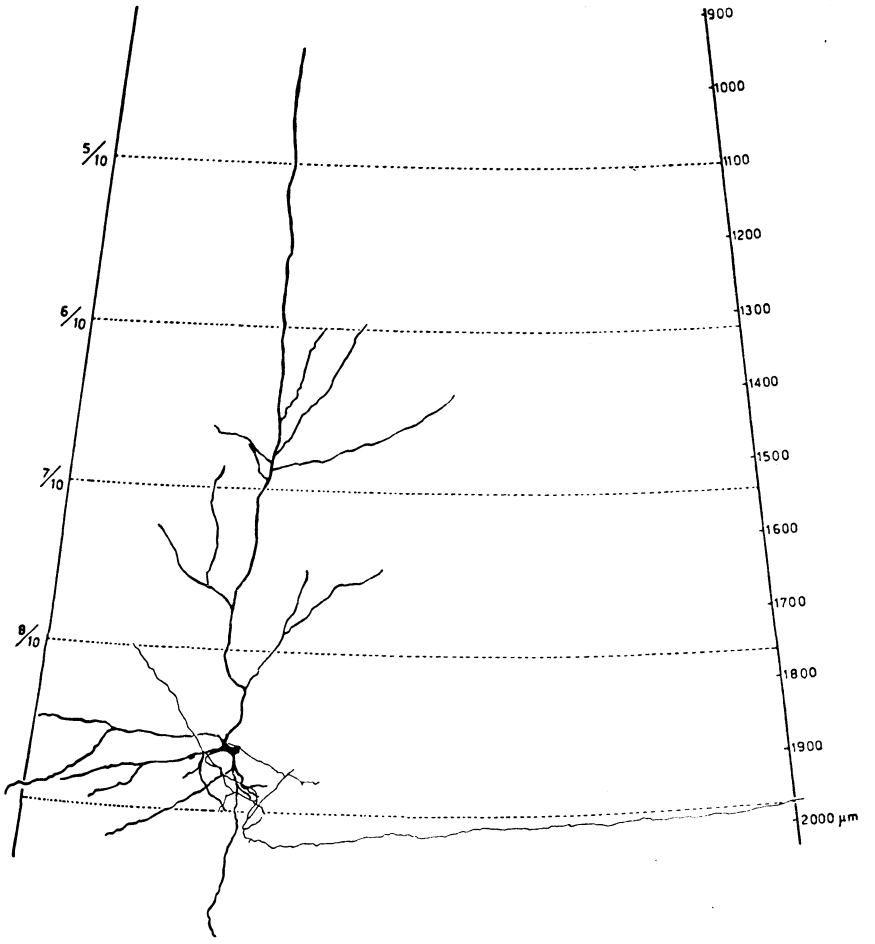


Fig. 11. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

la corteza, y las más grandes se encuentran en las capas inferiores (figs. 7 a 9). (En lo que respecta a las dendritas, estos datos han recibido un tratamiento cuantitativo de manos de BOK, 1959).

Las neuronas con unas pocas dendritas descendentes oblicuamente poseen el axón ascendente y ramificado en un árbol no tan denso como el del primer tipo, pero no tan ralo como el del segundo. Se encuentran en la mitad inferior del córtex (figs. 10 y 11).

Si tenemos en cuenta únicamente cuatro criterios, a saber: grande o pequeña, ramificación axonal densa o rala, axón hacia arriba o hacia abajo y configuración dendrítica estrellada o cilíndrica, llegamos a dieciséis descripciones posibles, de las cuales encontramos nueve ocupadas por neuronas de nuestra colección; hecho que sugiere enérgicamente, incluso a este nivel de descripción tan tosco, una separación en tipos (en vez de una gradación). Así, por ejemplo, no vemos células piramidales con axón descendente y arborización terminal densa, tampoco ninguna célula estrellada grande asimismo con axón descendente y arborización terminal densa, ni neuronas pequeñas con axón ascendente y arborización rala que no sean estrelladas, etc.

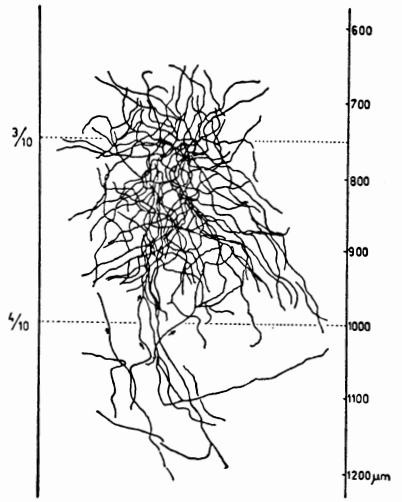


Fig. 12. (Para la leyenda véase la fig. 4.)

Otro supuesto tácito de que nos hemos valido en nuestra abstracción se refiere a la posibilidad de reemplazar los "árboles" reales de las dendritas y los axones por regiones continuas a las que se haga corresponder únicamente una densidad determinada (véase, por ejemplo, SHOLL, 1956). Esta operación se efectuaba en la creencia de que la dispersión axonal es realmente mucho más difusa y regular de lo que las ilustraciones (de CAJAL) en las que se ha basado nuestro modelo permiten ver; pero

nuestro propio material nos lleva a corregir tal creencia en el sentido de que no hay razón alguna para suponer que los ralos árboles axonales de las células piramidales de nuestras preparaciones estén, en realidad, incompletos, puesto que las mismas preparaciones de otros tipos de células ofrecen una ramificación axonal mucho más densa. Debe recordarse, sin embargo, que lo que hemos dicho de que todos los tipos de neuronas dan lugar de modo difuso a una "nube de excitación" en su "campo axonal" puede no estar demasiado lejos de la verdad, ya que en el esquema tenemos que suponer, en la mayoría de los casos, que se excita a la vez todo un grupo de células piramidales próximas; y la suma de sus campos axonales, fuertemente solapados, dará lugar, al dispararse, a una densidad de excitación compatible con lo dicho arriba.

Además de las células de los granos, también las fibras que entran en la corteza por la parte inferior —que probablemente habrá que identificar con las "aferentes específicas" de otras descripciones— tienen arborizaciones terminales muy densas (fig. 12).

También puede argumentarse, a favor de que la tinción de GOLGI de nuestras preparaciones, que hace ver pocos colaterales de los axones de

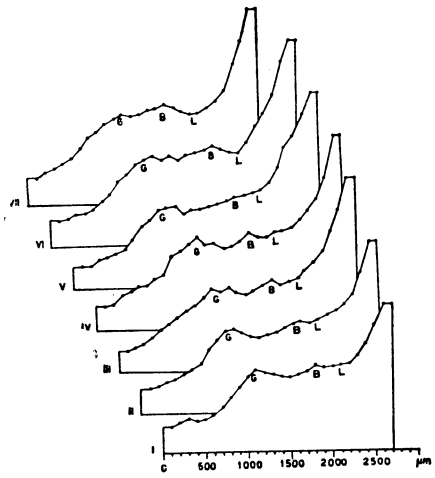


Fig. 13. Esta familia de curvas representa, para siete puntos de córtex parietal humano (distanciados de 1,5 a 2 mm), la densidad óptica de las preparaciones mielínicas en función de la distancia a la superficie de la corteza. (Según VOTA, 1961.)

las células piramidales, no elimina gran cosa, apoyándose en los siguientes testimonios empíricos indirectos (figs. 13 y 14).

Podemos admitir que la densidad óptica de las preparaciones mielínicas de la corteza representa la densidad de los axones y colaterales mielinados (esto es, largos y sin ramificar). En la figura 13 presentamos, como ejemplo, un conjunto de gráficas de la densidad óptica en función de la

profundidad (por VOTA, de nuestro laboratorio) que corresponden a puntos cercanos entre sí del córtex parietal; podemos comparar estas curvas con el diagrama representado en la figura 14 (tomado de BRAITENBERG, 1962), en el que puede verse cómo contribuyen los distintos tipos de elementos (fibras ascendentes y descendentes y los colaterales horizontales)

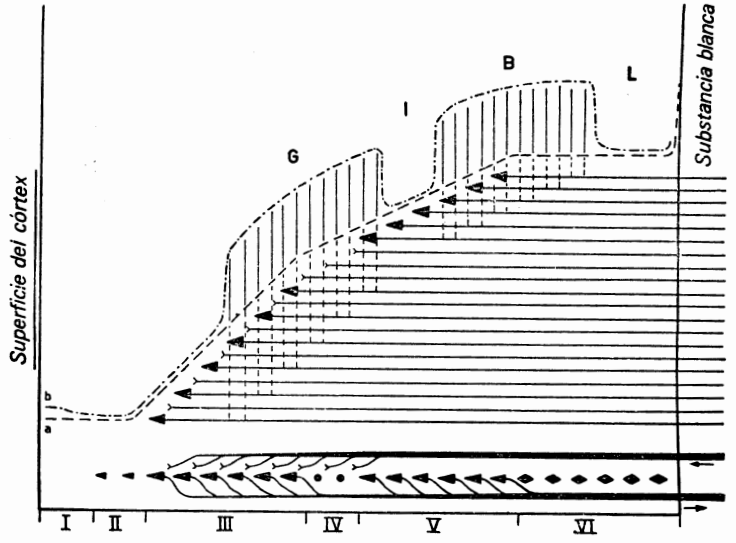


Fig. 14. Diagrama de la densidad esperable de las fibras mielinadas en distintos estratos del córtex cuando se supone que llegan a la parte superior del mismo un número de aferentes correspondiente en densidad a las fibras eferentes y, además, que por cada célula piramidal hay una fibra que va a la sustancia blanca y dos colaterales horizontales de longitud fijada. (Según BRAITENBERG, 1962.)

a la población de fibras mielinadas, según es de esperar basándose en el panorama que ofrece el método de Golgi. Y puede sostenerse que la forma de las curvas densitométricas reales sólo es compatible con un número bastante pequeño de colaterales horizontales (alrededor de dos o tres), de unos pocos cientos de micras de longitud, por cada axón descendente, pues de otro modo los dos máximos de densidad de fibras conocidos con el nombre de "estrías de Baillarger" (G y B en el diagrama) tendrían que destacarse mucho más del fondo de la población de fibras verticales.

CONCLUSION

A medida que progresan nuestras observaciones histológicas —e histonómicas —sobre la corteza cerebral va aumentando la confianza que tenemos en nuestro propio intento de traducir la estructura de la sustancia gris en conjuntos de ecuaciones neurónicas. Es perfectamente posible que

semejante traslado directo a partir de la estructura no sólo llegue a ser un método útil en neurofisiología, sino incluso necesario, si es que las limitaciones intrínsecas de las técnicas de registro electrofisiológico resultan ser demasiado graves. Por desgracia, hay una dificultad que se superpone indistintamente a las dificultades propias de nuestra traducción histofisiológica y a las de las técnicas citadas, ya que los resultados que ambos métodos pueden ofrecer en el mejor caso (esto es, tablas de relaciones funcionales entre puntos o elementos individuales de la sustancia gris) no son otra cosa que la materia prima para una teoría que haga ver de qué modo la actividad total se deriva de los acoples individuales; y esto, según nos informan los físicos, es un problema sumamente arduo en sí mismo.

RECONOCIMIENTO

La investigación expuesta en este trabajo ha sido patrocinada, en parte, por la European Office, OAR, de la United States Air Force.

RESUMEN

Hemos examinado algunos aspectos de la histología, la histonomía y la histo-lógica [*histologics*] en relación con la cibernética.

Si nos volvemos hacia los métodos histológicos con objeto de satisfacer la curiosidad cibernética que tenemos acerca de las configuraciones conectivas en las redes nerviosas animales reales, existen, verdaderamente, buenas razones para separar nuestra actividad de la histología tradicional, según ha hecho nuestro huésped, y para bautizarla con algún nombre nuevo, como el de histonomía, por ejemplo. Y si nos sentimos inclinados a abstraer redes de relaciones lógicas partiendo de redes nerviosas, podemos llamar jocosamente a esta tarea histo-lógica.

Las dificultades que encontramos en ella son de varias clases, si bien se pueden leer inmediatamente y con cierta seguridad en la imagen histológica diversos datos fisiológicos (acerca de la velocidad de conducción en axones, la atenuación en dendritas, las sinapsis, etcétera).

Pero hay cosas, como la distinción morfológica entre las sinapsis excitadoras y las inhibidoras, que son aún muy discutibles, y no se conoce aún forma alguna de inferir el umbral de una neurona a partir de la histología. Otra dificultad se refiere al formalismo, puesto que si nos decidimos a representar hipotéticamente un fragmento de sustancia gris por una tabla de coeficientes de acople entre neu-

ronas dispuestas de acuerdo con cierta geometría, nos vemos en un gran aprieto —incluso si dicha geometría es muy reiterativa— cuando tratamos de manejar fórmulas que contengan un millón de variables o más. Pero ello no debe disuadirnos de hacer el intento: podemos inferir algunos aspectos aislados de la lógica de ciertos aspectos de la histología (tipos de simetría, máxima profundidad lógicamente posible, grado de complejidad). En algunos casos —así en el córtex cerebeloso— el examen visual y la intuición pueden bastarnos para llegar a unos esquemas lógicos plausibles; en el caso de la corteza cerebral, que ilustramos con material procedente de nuestro análisis realizado por el método de Golgi, es preciso contentarse con vislumbres parciales. F. LAURIA, de nuestro laboratorio, está preparando un programa para computadora que representa un pequeño trozo de materia gris cortical, y que puede ayudarnos a determinar, mediante un proceso de tentativa y error, algunas de las constantes desconocidas del esquema lógico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ARIENS KAPPERS, C. U. (1920): *Die vergleichende Anatomie des Nervensystems der Wirbeltiere und des Menschen.* Haarlem, Erven F. Bohn.

BEURLE, R. L. (1954a): Activity in a block of cells capable of regenerating pulses. *RRE Memorandum, 1042.*

BEURLE, R. L. (1954b): Properties of a block of cells capable of regenerating pulses. *RRE Memorandum, 1043.*

BOK, S. T. (1959): *Histonomy of the Cerebral Cortex.* Amsterdam, Elsevier.

BRAITENBERG, V. (1961a): Funktionelle Deutung von Strukturen in der grauen Substanz des Nervensystems. *Die Naturwissenschaften, 48,* 489-496.

BRAITENBERG, V. (1961b): Functional interpretation of cerebellar histology. *Nature, 190,* 539-540.

BRAITENBERG, V. (1962): A note on myeloarchitectonics. *Journal of comparative Neurology, 118,* 141-156.

BRAITENBERG, V., y LAURIA, F. (1960): Toward a mathematical description of the grey substance of nervous systems. *Nuovo Cimento, Suppl. 2, 18,* 149-165.

BRAITENBERG, V., y ONESTO, N. (1960): The cerebellar cortex as a timing organ. Discussion of an hypothesis. *Proceedings 1st International Conference on Medical Cybernetics* (pp. 1-19).

CAIANIELLO, E. R. (1961): Outline of a theory of thought-processes and thinking machines. *Journal of Theoretical Biology, 2,* 204-235.

CAJAL, S. R. (1911): *Histologie du Système Nerveux de l'Homme et des Vertébrés.* Madrid, C.S.I.C.

FARLEY, B. G., y CLARK, W. A. (1961): *Information Theory: Fourth London Symposium,* ed. de C. Cherry. Londres, Butterworths.

SHOLL, D. A. (1956): *The Organization of the Cerebral Cortex.* Londres, Methuen and Co. [versión castellana: *La organización de la corteza cerebral,* 2.ª ed., Buenos Aires, Eudeba, 1964].

UTTLEY, A. M. (1955): The probability of neural connexions. *Proceedings of the Royal Society, Series B, 144,* 229-240.

VOTA, U. (1961): Observaciones no publicadas.

Estudio de la cibernética del comportamiento de aprendizaje

Por GORDON PASK

INDICE

1. Modelos anteriores del aprendizaje ... 234
   1.1. Los modelos psicológicos y los fisiológicos ... 234
   1.2. El enfoque de la cibernética ... 235
2. La concepción del aprender ... 236
   2.1. Comportamiento adaptativo y aprendizaje ... 236
   2.2. Lo que implica el aprender ... 236
   2.3. El criterio de la identificación ... 237
   2.4. Restricciones impuestas a los mecanismos y modelos del aprendizaje. 237
   2.5. Los autómatas finitos ... 238
   2.6. La necesidad de muchas representaciones ... 238
   2.7. Campo de la indagación ... 239
3. La verificación experimental ... 240
   3.1. La dificultad referente a las ideas lingüísticas ... 240
   3.2. Medios en los que se produce el aprendizaje ... 240
   3.3. Contrastaciones del comportamiento de aprendizaje. ... 244
   3.4. Los sistemas capaces de aprender ... 245
   3.5. El mecanismo del aprendizaje ... 249
4. Los organismos en evolución ... 250
   4.1. Los sistemas evolutivos ... 250
   4.2. Invariancia de una organización ... 252
   4.3. El origen de la indeterminación ligada al aprendizaje ... 252
   4.4. Identificación de muchos sistemas evolutivos en el cerebro ... 253
5. Los mecanismos físicos ... 253
   5.1. Un modelo particular ... 253
   5.2. El medio interno ... 254
   5.3. Los sistemas memorizadores, los mecanismos del aprender y los organismos en evolución ... 255
   5.4. El sistema α ... 255
   5.5. El sistema β ... 257
   5.6. La identificación entre los sistemas α y β ... 258
6. La evolución de los organismos ... 260
   6.1. Los organismos como seres que toman decisiones ... 260
   6.2. La interacción entre los organismos en evolución ... 262

6.3. Un sistema auto-organizador ... 263
6.4. El mecanismo de la evolución ... 264
6.5. La necesidad de la evolución ... 265
6.6. El aprendizaje en relación con la evolución ... 265
7. Digresión sobre montajes físicos ... 265
7.1. Cómo se resuelve un problema insolventable ... 265
7.2. El solvento en un equilibrio inestable ... 266
8. Los distintos tipos de aprendizaje ... 267
8.1. Formas del mecanismo del aprender ... 267
8.2. La relación entre organizaciones ... 269
Apéndice ... 270
Referencias bibliográficas ... 281

1. MODELOS ANTERIORES DEL APRENDIZAJE

1.1. Los modelos psicológicos y los fisiológicos

Los modelos psicológicos del comportamiento de aprendizaje suelen describir los cambios que se producirán como resultado de una experiencia estipulada: consideran los estados estacionarios del organismo "antes" y "después" y, por lo general, desdeñan la transición, no estacionaria. Es cierto que los modelos estadísticos (ESTES, 1950; BUSH y MOSTELLER, 1955; SIEGAL, 1959) hacen amplios comentarios acerca del proceso que efectivamente se produzca, pero su valor predictivo se limita a parámetros tales como el número de ensayos necesario para satisfacer un criterio dado de ejecución. Pocos modelos psicológicos proponen un mecanismo del aprender, y los que lo hacen son susceptibles de contrastación [*testable*], pero muy restringidos, como, por ejemplo, el modelo de BROWN (1958) de la memoria a corto plazo y el de filtro de BROADBENT (1958); o bien, como sucede en el caso de HULL (1952) y de EYSENK (1956), existen ciertas dudas acerca de la condición de las variables intermedias introducidas. Todos los modelos susceptibles de contraste, sin excepción, están expuestos a la crítica de que se ocupan del aprendizaje en situaciones muy restrictivas —así la caja de SKINNER (1938) o un laberinto de psicología animal— y de que, en consecuencia, aun cuando se refieren al comportamiento adaptativo dentro de un conjunto limitado de alternativas, su validez como modelos del aprendizaje depende del supuesto de que pueda considerarse pertinente semejante faceta del comportamiento y desdeñarse todo el resto (el dar vueltas por aquí y por allá de la rata, los pensamientos que no van a ninguna parte en el hombre); mas los testimonios empíricos parecen contradecir esta suposición, y, si bien es difícil presentar algún otro tipo de modelo, no es exagerado decir que uno de esta forma se refiere a las selecciones reforzadas y pasa por alto completamente la cuestion de la atención.

Los modelos fisiológicos (PÁVLOV, 1927; SHERRINGTON, 1948; HYDÉN, 1960; BOK, 1961) evitan, acertadamente, comprometerse con el aprender como tal, y [simplemente] describen ciertos procesos que acontecen en el cerebro. (Así, PÁVLOV tenía una conciencia muy aguda de las dificultades que presentaría la extensión de sus modelos de condicionamiento más allá del campo corroborado experimentalmente.) En general, en cualquier modelo fisiológico es necesario distinguir con sumo cuidado la posibilidad de la realidad; no cabe duda, por ejemplo, de que un mecanismo de condicionamiento podría dar razón de cierto comportamiento adaptativo, pero esto es algo muy distinto de decir que podría hacerlo en cualquier organismo y en cualesquiera ocasiones.

1.2. El enfoque de la cibernética

Algunos modelos cibernéticos se derivan de una raíz psicológica; por ejemplo, el perceptrón de ROSENBLATT (1961) y el autómata de GEORGE (1961) se desarrollan apoyándose en gran medida sobre la teoría de HEBB (1949); otros, como las respectivas tortugas de GREY WALTER (1953) y ANGYAN (1958), tienen unos antecedentes conductistas más amplios.

Por otra parte, los modelos de neuronas, tales como el de HARMON (1961) y el de LETTVIN (1959), se basan en hechos de fisiología microscópica y tienen la misma capacidad de predicción —y vinculada a idénticas restricciones— que una construcción abiertamente fisiológica.

Luego vienen modelos que parten de unos pocos hechos fisiológicos (así las características conocidas o el grado de conexión de las neuronas), a los que añaden ciertas asunciones cibernéticamente plausibles. Al nivel microscópico, el trabajo de MCCULLOCH (1960) constituye el caso más explícito de esta técnica —aun cuando, de hecho, no se refiere tanto a la adaptación cuanto a la percepción—, puesto que sus supuestos proceden de la lógica booleana (RASHEVSKI, 1960, describe diversas retículas que *son* adaptativas); UTTLEY (1956), valiéndose de otro conjunto de asunciones, ha sometido a consideración la hipótesis de que en el sistema nervioso esté muy generalizado el cálculo de probabilidades condicionales. Al nivel macroscópico, BEURLE (1954) ha construido un modelo mecánico-estadístico en el que entra una población de neuronas artificiales simulada con éxito, mientras que las propuestas de NAPALKOV (1961) se encuentran entre ambos extremos, el microscópico y el macroscópico.

Los cibernetistas se preocupan, de un modo enteramente natural, de la lógica de los sistemas muy grandes y del calibre lógico de los procesos de aprendizaje. Así, WILLIS y CAMERON (1960) señalan las ventajas y las limitaciones de la lógica de umbrales, PAPERT (1960) estudia las restricciones impuestas sobre el proceso adaptativo en una retícula completamente arbitraria e IVAHNENKO (1962) ha publicado recientemente una serie de trabajos en la que se reconcilian las ideas, actualmente opuestas, del

cerebro como sistema maleable plenamente indiferenciado y como dispositivo bien estructurado dotado de unos pocos parámetros adaptativos; en cuanto a MACKAY (1951), ha debatido la filosofía del aprender como tal, lo que implica esta palabra y la medida en que *puede* simularse el comportamiento de aprendizaje, y ha propuesto, además, diversos autómatas parecidos al cerebro. Pero es ASHBY (1956) el que adopta un enfoque puramente cibernético frente al aprender: hace ver que los mecanismos fisiológicos constituyen casos particulares de los sistemas completamente generales en los que se patentizan principios tales como el de la homeóstasis y el de la estabilidad dinámica, estudia el comportamiento de estos sistemas y pone ante la vista la verdadera faz de enunciados tales como "el sistema aprende" o "el sistema tiene memoria": se trata de aserciones que son relativas a un observador determinado.

2. LA CONCEPCION DEL APRENDER

2.1. *Comportamiento adaptativo y aprendizaje*

Los comportamientos adaptativos que llamamos "aprendizaje" están insuficientemente delimitados; por razones lógicas, es preciso mantener el "aprendizaje" separado de la sola adaptación —aun cuando ésta acompaña siempre a aquél—, ya que si no se hace esta distinción se convierten en vacíos la mayoría de los comentarios mecanísticos acerca del asunto, pues ASHBY ha puesto de manifiesto que todo montaje [*assembly*] dinámico grande tiene que adaptarse y que retener alguna huella de su configuración anterior; y de ahí que decir que un cerebro o un artilugio grande *presentan* semejante comportamiento sea una observación indiscriminadora y casi tautológica. Y parejamente es menester que se distinga entre "memoria" (inferida de un comportamiento observado de aprendizaje) y "retención".

Otro de los resultados de ASHBY (1958) ha acabado con la creencia, antes popular, de que el "aprender" es simplemente una adaptación *dirigida* a cierto objetivo, como, por ejemplo, la conservación del organismo que aprenda; se trata de una visión excesivamente ingenua, ya que todos los sistemas estables son homeostáticos en un medio soportable, y a toda homeóstasis podemos concederle que tiene un objetivo; y si el medio sufre una perturbación especialmente regular, los cambios adaptativos que mantienen la homeóstasis se llaman *habituación* —que es una consecuencia previsible de una estructura perfeccionada.

2.2. *Lo que implica el aprender*

Casi todo el mundo admite que, por encima de la adaptación dirigida, el aprendizaje entraña la construcción y apreciación de un orden entre

objetos o entre sus imágenes: un organismo que aprende se vuelve capaz de habérselas de modo coherente con su medio (o con el flujo de su propia actividad autónoma) al imponer un plan sobre unos constituyentes que de otro modo se dispondrían fortuitamente. MINSKY y SELFRIDGE (1960) exigen, en la fraseología de la "inteligencia artificial", que se ponga a punto "una heurística" como índice del aprendizaje, en tanto que MACKAY (1956) ha mantenido una tesis muy parecida: la de que el aprendizaje de cualquier índole involucra la constitución de una jerarquía de *lenguajes* (o sistemas de signos y de relaciones); y esta jerarquía será realista en la medida en que pueda efectuarse algún tipo de traducción entre tales distintos niveles del discurso.

2.3. *El criterio de la identificación*

Para los fines presentes nos vamos a confinar al acto de la identificación —o, en el sentido de CARNAP (1947), a una interpretación, a base de un *designatum,* de cierto signo no lógico de un cálculo— como rasgo crucial del aprender (pues la "traducción de un mensaje entre lenguajes" y la "identificación de una pareja de secuencias de signos que por lo demás no sean comparables" son operativamente equivalentes). En consecuencia, un organismo que *aprenda* tiene que ser asimismo capaz de identificar los estímulos pertinentes (o valores de los atributos de su medio), de suerte que fije la atención sobre un universo del discurso limitado, en el que se encuentren incluidos tales estímulos y las distintas posibilidades de respuesta entre las que se produzca la adaptación; y, análogamente, tiene que formar y emplear unos "conceptos" —o generalizaciones— dotados de algún marbete [*named*], proceso cuyo punto clave es la identificación entre conceptos distintos (a la que llamamos "caer en la cuenta" [*insight*]), y no la agregación de rasgos comunes, que es un resultado relativamente trivial de la adaptación forzosa. (Adviértase que el tipo mencionado de "identificación" es una "traducción".)

2.4. *Restricciones impuestas a los mecanismos y modelos del aprendizaje*

Una vez que hemos adoptado un punto de vista algo más quintaesenciado sobre el aprender, nos vemos obligados a desprendernos de la mayoría de las representaciones de la actividad mental o la neural, por inequívocas y familiares que nos sean: en particular, los modelos, tan estrechos, de la teoría de la información metrizada son unos vehículos insuficientes para la descripción de cualquier *mecanismo* que haya de dar cuenta del comportamiento de aprendizaje (PASK, 1958 a *y* b). Naturalmente, en cierto sentido se comunica y se transforma información cuando un organismo aprende, pero, como señala GREENE (1961) al observar que los perceptos conllevan resonancias de otros mensajes, no en el sentido de ninguna teo-

ría de la información metrizada. McCULLOCH y MACKAY (1952) han dicho poco más o menos lo mismo al debatir la condición de las "señales" en el cerebro: la información está representada de varias formas, por ejemplo, a base de la cuota de impulsos y de la relación de fase entre ellos, pero ni un impulso ni ningún otro suceso constituyen inequívocamente una señal.

2.5. *Los autómatas finitos*

Ahora bien, la teoría de la información puede aplicarse en el marco de una representación cualquiera, que define así un conjunto de resultados, mensajes y códigos permitidos; análogamente, cualquier representación define un conjunto de modelos abstractos, que pueden identificarse con un cerebro físico por un observador que especifique la descripción de estado que vaya a aplicar y forme un *sistema* en el sentido de ASHBY; algunos de estos sistemas constituyen imágenes *isomórficas* u *homomórficas* unos de otros, y *dentro* de semejante *conjunto* de sistemas, perfectamente relacionados, existe un cálculo equivalente al de la teoría de la información. La retícula de "neuronas artificiales" de McCULLOCH y PITTS (1947) es un modelo abstracto típico, su identificación con los atributos de cierta parte del cerebro, un sistema típico, y en este caso el conjunto transformable de sistemas forma el conjunto de los autómatas finitos (posiblemente sometidos a restricciones).

Pero no hay ninguna garantía de que la teoría de la información —ni ningún otro cálculo— sea aplicable *entre* representaciones; y, en realidad, tenemos que suponer lo contrario.

2.6. *La necesidad de muchas representaciones*

Así pues, hemos sostenido que el aprender depende en forma crucial de un acto de identificación, o, dicho de otro modo, de una relación *entre* representaciones distintas de los datos. Mas entonces no es posible —o, en el mejor de los casos, rara vez lo será— describir el proceso del aprendizaje a base de un sistema de información único: normalmente será necesario que el observador que esté estudiando el aprendizaje reconstruya *su propia* identificación y vuelva a constituir *su propia* descripción de estado siempre que el organismo observado "varíe la atención" o presente un "comportamiento de caer en la cuenta" (esto es, siempre que este organismo varíe *su* identificación).

No hay ningún sistema que, *él solo,* pueda representar el mecanismo que subyace al aprender, ni puede sostenerse que aprenda ningún autómata finito. La búsqueda *del* mecanismo del aprendizaje es o indebidamente unilateral y limitada o equivocada, puesto que lo que está coordinado al comportamiento de aprendizaje es la actividad de muchos sistemas y no la

de uno solo (o bien podemos decir, en el sentido en que usaba la expresión VON FOERSTER, 1960, que es un solo sistema auto-organizador del cual son componentes los sistemas aislados, que están relacionados entre sí en virtud de la aparición del aprendizaje, y posiblemente de ningún otro modo).

2.7. *Campo de la indagación*

Importa mucho percatarse de que lo que acabamos de decir es aplicable a un campo de indagación, a saber: al "comportamiento de aprendizaje", y no a todas las facetas de la actividad mental o la neural. De modo que HARMON (1959) se apoya en un terreno sólido cuando dice que los impulsos son los componentes mínimos de los mensajes en *el* lenguaje de las neuronas: pura y simplemente porque no se refiere directamente al aprender y, en consecuencia, puede estudiar los acontecimientos en *un solo* sistema lingüístico. Pero como nosotros *sí* nos ocupamos del aprendizaje, las inquisiciones pertinentes se refieren a muchos sistemas lingüísticos (cuya estructura varía como consecuencia del proceso que se inquiere); y por ello ni podemos permitirnos unos modelos tan elegantes y cómodos ni, en el estado actual de los conocimientos, cabe reducir —por ejemplo, valiéndose del procedimiento de NAGEL (1949)— las aserciones acerca del aprender a expresiones pertenecientes al marco conceptual de las retículas neurales.

Por otra parte, exactamente tan absurdo sería insinuar que las retículas y los autómatas finitos carecen de valor en el papel de recursos explicativos como insinuar que los modelos de las moléculas químicas mediante enlaces son artefactos explicativos carentes de valor en la química de las reacciones; pues si bien es legítimo hacer notar que las retículas neuronales (o los modelos mediante enlaces) son incapaces de responder a nuestro inquirir por los mecanismos del aprendizaje (o de la dinámica de una reacción), las combinaciones probabilísticas de ambos tipos de modelos tienen valor predictivo. Su virtud es la sencillez conceptual, y su punto débil consiste en que, dada una combinación probabilística que parezca ajustarse a los hechos, seguimos teniendo una indeterminación * (PASK, 1962; VON FOERSTER y PASK, 1960/1961) o incertidumbre con respecto a la *forma* de la organización a que, en definitiva, haya que atribuir el comportamiento observado.

---

* Empleamos la palabra «indeterminación» para distinguir esta incertidumbre de la otra, la clásica (con la que estamos más familiarizados), la cual, cuando se tiene dado un conjunto de atributos pertinentes definidores de un sistema, se refiere al estado de éste. Mientras que la incertidumbre «clásica» disminuye al hacer más observaciones microscópicas, a la «indeterminación» no le ocurre lo mismo. (Aunque aquélla puede perturbar a menudo las observaciones reales que se efectúen en cerebros, apenas tiene nada que hacer en lo que vamos a decir.)

Esta indeterminación procede de que hablamos en un lenguaje acerca de una construcción teorética [*construct*] que entraña muchos lenguajes, y sólo cabe eliminarla mediante un acto de identificación: en particular, si el observador traduce las expresiones del lenguaje de la descripción del modelo de retículas (o del modelo de los enlaces) a la descripción correspondiente en un lenguaje de mayor amplitud o *metalenguaje.*

3. LA VERIFICACION EXPERIMENTAL

3.1. La dificultad referente a las ideas lingüísticas

Con objeto de poder pasar de las organizaciones abstractas a los montajes físicos (como los cerebros del hombre, los animales y los artilugios), hemos de idear varias contrastaciones [*tests*] experimentales del aprendizaje. En este estadio, la mayor dificultad reside en limitar el estudio a la cuestión del aprender; y en mi intento de eludir toda la gama del comportamiento lingüístico, es posible que haga violencia a muchas ideas lingüísticas, ya sea por cometer inadvertidamente errores como por especializar de modo deliberado pero ilegítimo.

3.2. Medios en los que se produce el aprendizaje

Los constituyentes primitivos de una situación de contrastación son: un organismo (del que se dirá, una vez sometido a contraste, que *ha aprendido* o que no lo ha hecho), su medio de objetos y de acciones y su observador. Este puede actuar y responder frente a las acciones que constituyan el medio, cosa que hará en forma dependiente de la medida en que infiera tener alguna semejanza con el organismo; si éste es un hombre, suponemos que el observador infiere que existe una semejanza considerable, y si es un animal o un artilugio, que la semejanza es bastante pequeña. Pero, en cualquier caso, la inferencia se apoya en razones muy distantes de los testimonios experimentales.

El organismo y el observador siempre aplican marbetes al medio de un modo que en algún sentido les es común. 1) Cuando la inferencia de semejanza es muy fuerte, se admite que el observador y el organismo identifican esencialmente del mismo modo el conjunto de posibles objetos y acciones, y, por tanto, que éstos constituyen, por una parte, un conjunto de estímulos —o, en el caso del discurso verbal, de palabras—, y, por otra, un conjunto de posibilidades denominables de respuestas —que pueden también ser palabras o sucesiones de palabras—. 2) Cuando falta una inferencia fuerte de semejanza, el observador, valiéndose de

observaciones o indagaciones anteriores de equivalencia de estímulos, tiene que ser capaz de *describir* los estímulos efectivos (así como hacerlos corresponder a objetos y acciones que él perciba) y de describir las posibilidades de respuesta del organismo; y de esta manera LETTVIN *et al.* (1959) han descrito el espacio de atributos perceptivos de la rana y de qué formas podría responder ésta.

Así pues, caracterizamos el medio de contrastación de un conjunto, X, de signos, x, de objetos y acciones que afecten al organismo en tanto que *entrada,* y un conjunto, Y, de signos, y, de acciones de respuesta que afecten a los objetos del medio, y que constituirán la *salida* (es evidente que para que X e Y constituyan señales representativas de una información ni uno ni otro conjunto pueden carecer de toda restricción). Supuesto esto, llamaremos a $X \cup Y$ el *vocabulario (finito)* de un *lenguaje operativo* (esto es, de un sistema consistente en los signos de X y de Y juntamente con las relaciones que aparezcan como invariantes del comportamiento del organismo), de modo que el organismo entablará un diálogo con su medio. Vamos a identificar provisionalmente las $x \in X$ con palabras "sujeto", los signos de salida, $y \in Y$, con palabras "predicado", y el organismo mismo con un operador cualquiera capaz de efectuar la operación "y, por tanto", del discurso coherente, con lo que se llegará a enunciaciones, (xy) (en el sentido de M. MASTERMAN, 1958). El mínimo organismo de este tipo —que entre en nuestro estudio formal— tiene que considerar o tomar en cuenta, al menos, cuando elija una y de Y, las posibles parejas de sujetos y predicados, x, y.

Es preciso subrayar que toda construcción en la que entren organismos y un lenguaje operativo está especificada con relación a un lenguaje científico o descriptivo, λ (que usan y comprenden los miembros de un grupo de observadores). No hay garantía alguna de que se conserve la estructura de los lenguajes operativos si se cambia el lenguaje descriptivo (de acuerdo con $\lambda \rightarrow \lambda^*$, digamos), si bien *cabe* que sea posible representar los sistemas de aquéllos de forma invariante con respecto a las transformaciones $\lambda \rightarrow \lambda^*$. El reciente examen de la lógica cibernética por GUNTHER (1962) indica que puede lograrse tal cosa, al menos en principio; mas, aun cuando admitimos que este relativismo es insatisfactorio, no vamos a ocuparnos más del asunto en el presente trabajo.

Ahora bien, un lenguaje científico es un metalenguaje en el que se describe un lenguaje operativo. Vamos a confinarnos a sistemas construidos en λ dentro de los que sea posible distinguir más de un lenguaje operativo.

Denotemos con α y β estos últimos lenguajes, y sus vocabularios (finitos) con $X^\alpha \cup Y^\alpha$ y $X^\beta \cup Y^\beta$; supongamos que las enunciaciones admisibles —o sensatas— tienen la forma $E = (x, y)$, y denotemos con $E^\alpha \subset X^\alpha$

$\otimes Y^{\alpha}$ * el conjunto de enunciaciones admisibles de α, y con $E\beta \subset X\beta \otimes Y\beta$ el de las enunciaciones admisibles de β.

Si hacemos el estudio en forma algo vaga, no es demasiado difícil especificar las condiciones que hay que satisfacer para que α y β existan en nuestra descripción en λ. Por ello vamos a dar aquí una versión a grandes rasgos, y seremos un poco más precisos cuando sea necesario serlo, más adelante (véase el apéndice).

1) Si α y β son lenguajes operativos en λ, tiene que ser posible distinguir (también en la descripción en λ del sistema) unos *organismos* separados entre sí capaces de usar estos lenguajes para la comunicación.

2) Estos organismos tienen que pertenecer, por lo menos, a una pareja de especies distintas (digamos la especie *A* y la especie *B* de organismos), y la comunicación tiene que *acontecer* entre los miembros de cada especie; comunicación que en el caso de α estará caracterizada por las enunciones $e \in E^{\alpha}$, y en el de β por las enunciaciones $e \in E\beta$.

3) Para que α y β sean distintos, el sistema de comunicación de *A* tiene que ser distinto del de *B* (diferencia esta última que puede garantizarse de varios modos, de los que sólo citaremos uno).

4) (I) Tiene que haber, al menos, algunos signos empleados en el discurso en α que no aparezcan en el discurso en β, y viceversa; por tanto, $(X^{\alpha} \cup Y^{\alpha}) \cap (X\beta \cup Y\beta) \subset (X^{\alpha} \cup Y^{\alpha}) \cup (X\beta \cup Y\beta)$. (II) Es conveniente suponer que E^{α} y $E\beta$ son disjuntos, con lo cual $[E^{\alpha} \cap E\beta] = 0$ (denotando con 0 el conjunto vacío). (III) Lo que pretendemos con (II) es que E^{α} y $E\beta$ sean conjuntos de enunciaciones que gocen de la propiedad de que, para toda $e_0 \in E^{\alpha}$, "e_0 signifique lo mismo para todos los organismos de la especie *A*", y, análogamente, de que, para toda $e_1 \in E\beta$, "e_1 signifique lo mismo para todos los organismos de la especie *B*". (Más adelante haremos más precisa la relación de "significar lo mismo"; por el momento, supóngase que una enunciación dada "significa lo mismo" para un par de organismos si cuando se la recibe en las mismas condiciones induce el mismo comportamiento.) (IV) De aquí que $[E^{\alpha} \cap E\beta] = 0$ implique que no hay ninguna *e* que signifique lo mismo para *todos* los organismos de la especie *A* y *todos* los de la especie *B*.

5) Esta condición (que entraña una falta completa de relación entre α y β con respecto a unos signos universalmente interpretados) constituye una pantalla más restrictiva de lo necesario, aun cuando es conveniente adoptarla. Pero, en cualquier caso, hay que insistir en que α y β ni son imágenes isomórficas ni homomórficas uno de otro cuando el "y, por tanto" que precede a *x, y,* se interpreta como una *composición* **.

---

* Como es obvio, el signo $\otimes$ indica que se ha de efectuar el *producto cartesiano* (de los conjuntos entre cuyos símbolos se encuentre); y, por consiguiente, vale para formar el conjunto cuyos miembros son todos los pares cuyo primer elemento sea un miembro del primer conjunto (aludido), y cuyo segundo elemento sea un miembro del segundo conjunto (aludido). *(N. del T.)*

** En el sentido que tiene este término en el álgebra general. *(N. del T.)*

6) Sin embargo, tiene que haber alguna posibilidad de "traducción" de α a β, o viceversa. Interpretaremos que una traducción es una transformación especial que tiene como parámetro el índice del organismo concreto que la efectúe; y con este propósito introducimos el concepto de zona limitada de "significado": un signo de α puede significar lo mismo para un miembro de la especie *A* de organismos que cierto signo de β, o que cierto conjunto o determinada sucesión de signos de β (pero esto no puede constituir una implicación universal, válida para todos los miembros de la especie *A*). Análogamente, los organismos de *B* pueden emplear una traducción para interpretar signos de α.

Vamos a sostener que la posibilidad de "traducción" descansa en cierta semejanza entre los organismos de la especie *A* y los de la *B*, semejanza que existirá aun cuando usen sistemas de comunicación diferentes. (Nos vamos a ocupar principalmente de las semejanzas de estructura física y de las existentes en la relación entre tales organismos y un medio común, pero hay otras muchas posibilidades; así, un francés y un italiano gozan de un trasfondo cultural común y sus discursos poseen un contenido semántico parecido.)

7) El lenguaje operativo α y el β carecen de relación en lo que se refiere a las aserciones *universalmente* verdaderas de los organismos partícipes, pero, desde luego, están perfectamente relacionados tanto desde el punto de vista del observador con λ como desde el de un organismo concreto que *identifique* o *traduzca* un conjunto de enunciaciones —y, por tanto, de acuerdo con nuestros criterios, de un organismo que *aprenda.*

Las relaciones posibles α, β y β, α son: (1) que α y β caractericen unos sistemas de comunicación capaces de mantener el mismo nivel de discurso, o bien (2) que α sea un metalenguaje con respecto al lenguaje operativo β (y, por consiguiente, capaz de describir algunos aspectos de éste) o que, a la inversa, β sea un metalenguaje con referencia a α. Si α es un metalenguaje para con β (o viceversa), las funciones que determinan el discurso en α son de *orden* superior (y las proposiciones de α, de *tipo* lógico superior) que las funciones lógicas y proposiciones correspondientes de β (y la jerarquía de órdenes o tipos estará determinada por proposiciones elementales de λ). Por perfilar esta cuestión: los signos de α que abarquen, por ejemplo, "mobiliario" no pueden derivarse de signos de β tales como "mesa" o "silla"; y decir que "mobiliario" no puede derivarse de expresiones de β significa: *a*) que la categoría del mobiliario, mirada como concepto *adyuntivo* [*disjunctive*] de β tiene que definirse ostensivamente, por medio de ejemplares, si bien la elección de éstos es ilimitada (sólo podremos especificar un mobiliario como las mesas, sillas y otros objetos señalados por un organismo con β), y *b*) que si la categoría de "mobiliario" se considera como un concepto conyuntivo en el que estén entrañados los atributos comunes a las sillas y las mesas, la elección de

atributos es ilimitada (y sólo podremos especificar el subconjunto concreto elegido por el organismo con β).

8) Esta especificidad de los organismos hace pensar que, cualquiera que sea la condición lógica de α y de β (desde el punto de vista del observador, λ), todo organismo de *B* que efectúe una traducción de α a β tiene que utilizar β como metalenguaje, ya que ha de construir una descripción, basada en su propia experiencia, del uso de los términos de α. Y hasta podemos sostener que tiene que construir dentro de sí mismo una imagen de un organismo de *A*, y mirar al medio representándoselo al modo de un *A*.

En el caso límite (que estudiaremos al hablar del *mecanismo* del aprendizaje), los análogos de los organismos de *A* y *B* tienen un repertorio de enunciaciones que especifica completamente sus comportamientos: no pueden manifestarse de ninguna otra forma, y para poder existir tienen que hacer precisamente tales enunciaciones. Así pues, una traducción completa de α a β ejecutada por un organismo de *B* equivale a construir una réplica informativa de un organismo de *A* en el elemento o medio del organismo de *B* que sea; dicho de otro modo, una traducción $\alpha \rightarrow \beta$ equivale a *reproducir* un organismo de *A*. Volveremos en seguida sobre este punto, cuya importancia inmediata es la de demostrar que existe una identidad entre el criterio elegido del aprendizaje y las ideas que aparecen en la versión de WIENER (1961) del proceso de reproducción —ideas que actualmente se ocupa en desarrollar (WIENER, 1962)—; en concreto, vamos a identificar el aprender con una propiedad cibernética de ciertas organizaciones que se reproducen o evolucionan en elementos o medios tales como cerebros y agregados sociales, y a sostener que, al menos en ciertos casos especiales (el concepto de WIENER es aplicable al caso general del sistema reproductivo de "elementos opacos y transparentes" ["*Black and White Box*"]), el hecho de la evolución, que entraña algún mecanismo de reproducción, entraña asimismo la aparición de un comportamiento de aprendizaje.

3.3. Contrastaciones del comportamiento de aprendizaje

Se produce un aprender cuando el sistema que se dice que ha aprendido es capaz de identificar enunciaciones o signos de su lenguaje operativo con nuevos *designata;* y si éstos son enunciaciones de otro lenguaje operativo, el organismo puede aprender en la medida en que pueda efectuar una traducción.

Las pruebas con que se somete a contraste esta capacidad pueden involucrar o regimiento o comunicación; ambos tipos de pruebas se emplean corrientemente. En lo que se refiere al *regimiento,* el experimentador especifica que el sujeto asiente a un *objetivo* —o se sabe que lo acepta— que únicamente puede alcanzarse, o bien I) reconociendo atributos de sucesos o configuraciones de estímulos distintos, que no se hayan encontrado en

ocasiones anteriores (pruebas o contrastaciones que suelen considerarse de percepción o de abstracción), o II) construyendo una categorización nueva de los objetos del medio (se trata de pruebas de agrupamiento). En ambos casos se pide al sujeto que identifique unos signos de su propio lenguaje con signos del lenguaje de un bucle de realimentación, con lo que estabilizará el objetivo buscado (que el observador se habrá dado trazas para situar en el medio); y, como es natural, sólo puede detectarse así una forma particular de aprendizaje, a saber: una que entraña relaciones de orden que el experimentador mismo sea capaz de captar.

En cuanto a la *comunicación,* la situación de contraste es normalmente una entrevista (JOHN CLARK estudia * un caso especial). Suponemos que todos los pares de seres humanos tienen lenguajes operativos diferentes, o "maneras de pensar" de que prefieren valerse que son también —y de modo equivalente— diferentes (esta contrastación rara vez se aplica a los animales, debido a dificultades evidentes, pero no insuperables). En la conversación se produce una "traducción", en el sentido de que el compromiso que es necesario para mantener un discurso coherente acerca de un tema poco conocido involucra la construcción de un lenguaje o "manera de pensar" que sea inteligible a los interlocutores; y de ahí que el entrevistador que quiera evaluar lo aprendido trate de estimar la capacidad de los otros participantes para comunicarse en tal situación, descontando, en cuanto le sea posible, el efecto de variables extrañas tales como la "desconfianza" o una predisposición afectiva o emotiva. Este método tiene la desventaja de que el observador que lleva la contrastación es, a su vez, un participante, de modo que hay que traducir su evaluación a λ; y puede aplicarse una crítica análoga a la otra técnica posible, la de observar a una persona en interacción con un grupo de personas (para valorar la medida en que aquel individuo logre hacerse comprender, así como comprender el punto de vista adoptado por los demás).

3.4. Los sistemas capaces de aprender

Con objeto de mostrar que el "aprender" es una propiedad cibernética de las organizaciones, es necesario representar los sistemas que tomamos en consideración en nuestra descripción por medio de λ en forma suficientemente abstracta y general. Para nuestros fines actuales, la representación más conveniente es la de ROSEN (1958), en la que se concibe cada sistema como un grafo orientado **, tal como el que puede verse en la figura 1a.

Los arcos (orientados) del grafo corresponden a aplicaciones *F,* y los

* En el trabajo incluido en esta misma obra. *(N. del T.)*

** Esto es, un grafo (véase nuestra segunda nota al trabajo de P. LATOUR) en el que todos los arcos tengan marcado un sentido de recorrido. *(N. del T.)*

nodos, a la conjunción del dominio de una aplicación con los codominios o rangos de otras aplicaciones (según se indica en el apéndice).

Podemos valernos de esta representación, o bien para pintar la realización o corporeización física de un sistema de comunicación, Ξ (caso en el que las distintas aplicaciones del grafo representan unos subsistemas, Ξ_i,

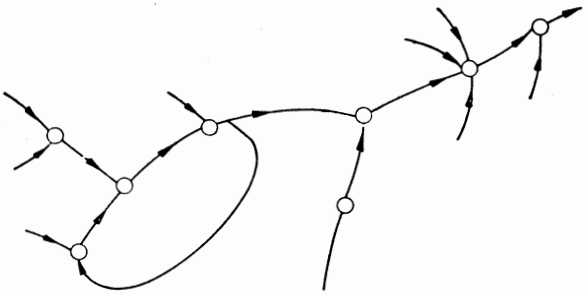


Fig. 1a

físicamente distintos y las funciones de acople entre ellos), o para pintar el sistema de comunicación como una estructura informativa, Ξ^{α} o Ξ^{β}, carente de referente físico concreto (y en este caso las aplicaciones son transformaciones de *signos,* y el grafo determina qué subsistema transformador de signos, Ξ_i^{α}, Ξ_k^{β}, puede proporcionar la entrada para otro, Ξ_j^{α}, Ξ_l^{β}). La comunicación entraña la existencia de subgrafos cíclicos, tales como el *a* y el *b* de la figura 1b.

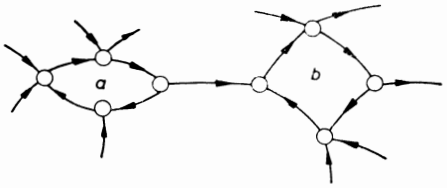


Fig. 1b

El proceso de adaptación se presenta en el nivel de la corporeización física, y se lo formaliza como un cambio sufrido por el parámetro φ_i (del subsistema Ξ_i), que selecciona una aplicación determinada, f_{φ_i}, de un conjunto de posibilidades, F_i. Puesto que el dominio de f_{φ_i} puede ser tanto el mismo de F_i como una *restricción* de él, la adaptación no solamente cambia el tipo de función que caracterice a Ξ_i, sino también los acoplamientos momentáneos entre Ξ_i y los demás subsistemas (dentro de los límites definidos por el grafo del sistema). Todos los subsistemas de interés son adaptativos.

Para pasar de la representación de la realización física de un sistema de comunicación a la de este sistema mismo es necesario abstraer unos atributos particulares de los estados físicos que sean capaces de actuar como signos, y cuyas secuencias constituyan enunciaciones.

Hemos dicho que, necesariamente, las aserciones acerca de los sistemas de comunicación y las referentes a su realización física son aserciones de tipo lógico distinto. Ahora bien, en λ tenemos que distinguir un par de sistemas de comunicación, *A* y *B*, entre los que medie una y la misma realización física; y por ello nos vemos obligados a considerar un par de abstracciones, una de las cuales induzca los signos de α y la otra los de β. Dentro de cada uno de los sistemas *A* y *B* tiene que producirse una comunicación, y los "signos" han de tener unas características sensatas: por ejemplo, si x es un signo de α, es razonable el requisito de que x "signifique lo mismo" para todos los subsistemas de *A* que "hablen" en α y que acontezca que estén adaptados de modo semejante; mientras que, con objeto de conservar la diferencia entre α y β, ningún signo de β podrá "significar lo mismo" para todos los subsistemas de *B*. A ello se añade, sin más que examinar el grafo orientado, que el calibre del enunciado x, y, es la relación entre un subsistema determinado y sus vecinos (pues X_i^α, el conjunto de signos que actúe como entrada de Ξ_i^α, será un conjunto producto, en tanto que Y_i^α será un factor de un conjunto producto); hemos insistido también, en *3.2*, en que las enunciaciones de α y las de β han de ser distintas.

Ahora bien, parece imposible encontrar una representación de la expresión "significar la mismo", a base únicamente de las estructuras informativas de *A* o de *B*, que esté aceptablemente alejada de lo trivial. Acaso la imagen mínima que eluda la crítica según la cual estaríamos hablando de un cálculo en lugar de hacerlo de un lenguaje sea la siguiente: "x significa lo mismo para Ξ_i y para Ξ_j si y sólo si, cuando $\varphi_i = \varphi_j$, la recepción de x en Ξ_i da lugar al mismo estado de Ξ_i que el que la recepción de x en Ξ_j induzca en Ξ_j"; así pues, el criterio de semejanza es una relación de equivalencia sobre los *estados* de la realización física, y tal vez posea el mismo origen arbitrario que la partición de los estados en estados de subsistemas distintos y que la construcción de un grafo orientado.

No es demasiado difícil imponer unas restricciones al sistema de modo que se definan $X^\alpha = \cup_i (X_i^\alpha)$ e $Y^\alpha = \cup_i (Y_i^\alpha)$ (juntamente con X^β e $Y\beta$), y que se garantice que $E^\alpha \cap E\beta = 0$, *supuesto que* la estructura subyacente de la realización física se conserve invariante, desde luego. Ahora es necesario que veamos qué es lo que implicaría en tal sistema una traducción y cómo podría representársela.

Hemos elegido el siguiente enfoque particular: dentro del sistema tal y como lo hemos presentado no puede producirse ninguna traducción, pero no hay razón alguna por la que las enunciaciones en α y en β de

unos subsistemas acoplados de A, $\Xi_i \cup \Xi_j$, por ejemplo, no pudiesen "significar lo mismo" que las enunciaciones de unos subsistemas acoplados de B, tales como $\Xi_k \cup \Xi_l$; pues aquellas enunciaciones son de la forma (e, e), y no de la e, y si los estados subyacentes (digamos, de Ξ_i) son z, que pertenecen a Z_i, los estados de un subsistema acoplado (digamos, de $\Xi_i \cup \Xi_j$) tendrán la forma (z, z), de $Z_i \otimes \Xi_j$. Ahora bien, la introducción de un acople muy vigoroso, que se opondría al concepto vigente de comunicación, sería completamente arbitraria, a menos que pudiésemos justificarla con independencia de nuestro deseo de tener un mecanismo de traducción; y vamos a intentar justificar esta innovación basándonos en que siempre que un acto de enunciación está *determinado* no constituye un acto de comunicación (pues al observar tal enunciación no se elimina ninguna incertidumbre referente al estado del receptor). Mas es posible construir un sistema en el que la adaptación lleve precisamente a esta situación determinista, de modo que primeramente se compela a comunicarse entre sí a unos grupos de subsistemas y que luego, como resultado de la comunicación, queden éstos tan estrechamente acoplados que no se los pueda seguir considerando como entidades distintas unas de otras; construcción que involucra la idea de la supervivencia de la fábrica o corporeización física de las Ξ_i, que dependería, por hipótesis, de ciertos bienes (representados por el índice $\theta(\Xi_i)$): en caso de que $\theta(\Xi_i)$ exceda de cierto valor arbitrario, θ_0, Ξ_i sobrevivirá; pero si no ocurre tal cosa, Ξ_i no sobrevive y el grafo orientado, Ξ_i^{α}, no está definido; de ahí que para cualquier adaptación realista haya de maximizarse $\theta(\Xi_i)$. Sea θ una medida superaditiva,

$$\theta(\Xi_i \cup \Xi_j) > \theta(\Xi_i) + \theta(\Xi_j)$$

y supongamos que se favorece la cooperación (o la comunicación) —cosa que tiene su razón de ser en que los resultados de $Z_i \otimes Z_j$ que dan los valores más elevados de θ son los que se alcanzan sistemáticamente si y sólo si las selecciones de estado están determinadas conjuntamente.

El mecanismo de traducción que proponemos —y, por hipótesis, de aprendizaje— pertenece a este tipo. Dado un sistema adaptativo, los subsistemas que originariamente estaban localizados se distribuyen, esto es, Ξ_i y Ξ_j se congloban formando $\Xi_i \cup \Xi_j$; luego, algunas enunciaciones de α empleadas por Ξ_i, e, llegan a "significar lo mismo" que las enunciaciones (e, e) empleadas por el sistema con distribución, y un proceso análogo tiene lugar en B, con lo que se producen unas enunciaciones de β, e, que se identifican con enunciaciones (e, e) de β; de este modo, a este nivel la identificación puede llegar a ser posible (y suponemos que lo es en cierto sistema concreto). En este caso se consigue una traducción de $e \in E^{\alpha}$ en $e \in E^{\beta}$, debido a la identidad inicial entre e y (e, e); el proceso físico subyacente que, por decirlo así, "mueve" el sistema es evolutivo, y basta reflexionar un poco para darse cuenta de que algunos subsistemas serán

incapaces de sobrevivir (por lo que, en realidad, tiene que haber un proceso de reemplazamiento o reproducción). Por tanto, la traducción involucra la construcción de un metalenguaje (ya que las funciones definidas mediante $[\Xi_i \cup \Xi_j] \cup [\Xi_k \cup \Xi_l]$ son funciones de las funciones de partida).

Terminamos haciendo algunas observaciones:

I) Un subsistema es, a su vez, un conjunto de enunciaciones.

II) Traducir estas enunciaciones —de β a α, por ejemplo— es un proceso de reproducción.

III) ROSEN (1958) ha sostenido que la autorreproducción es contradictoria: la "reproducción" se valdría, como agente de su proceso, de un sistema distinto y separado, tal como "el medio".

IV) En nuestro caso, el "medio" —que constituye también un requisito previo para una reproducción eficaz— está representado por la otra especie: así, Ξ_i y Ξ_j, de *A*, actúan conjuntamente a modo de medio que constituyese un agente de la reproducción de Ξ_k, que pertenece a *B*.

3.5. El mecanismo del aprendizaje

Aun cuando nos hemos limitado a situaciones en las que sea manifiesto el comportamiento de aprendizaje, la misma argumentación es aplicable a cualesquiera organizaciones: es válida en el caso de las que se encuentren en un cerebro humano, por ejemplo, o en un artilugio, con las que se llega prácticamente al mismo resultado a que hemos llegado experimentando con el comportamiento exteriorizado.

Existen varios modelos sumamente elegantes en los que las organizaciones evolucionan; ya hemos citado la matemática concepción de WIENER, y el modelo de CAIANIELLO (1961) se adapta idealmente a este campo de indagación. En uno y otro caso, las entidades que evolucionan en el medio de cierta retícula maleable (cerebro o artefacto), y que hemos de identificar con los *organismos* en evolución, son unos modos estables de oscilación; y, análogamente, existen conjuntos de modos estables que corresponden a la *especie* del organismo que evolucione.

En lugar de revisar todos estos conceptos, voy a llevar a cabo la menos ambiciosa tarea de describir un modelo que hemos construido, pequeño y en muchos aspectos ilegítimamente simplificado, pero que, sometido a contraste de acuerdo con nuestros criterios, se comporta como un "mecanismo que aprende" y es concebible que pudiera identificárselo con algunos procesos de un cerebro real y verdadero. Este modelo parte de la proposición de que el *aprendizaje* es el comportamiento característico de toda especie en evolución de subsistemas de un sistema evolutivo (idea muy parecida a la propuesta por PRINGLE, 1951, pero desarrollada por este autor de distinta manera). El caso particular que hemos estudiado es el de la evolución de subsistemas que constituyan sistemas auto-organizadores, esto es, sistemas con una cuota siempre positiva de cambio de

redundancia (VON FOERSTER, 1960; BEER, 1962); y como se trata más de un *modelo* que de un montaje *observado,* lo *construiremos* en λ.

4. LOS ORGANISMOS EN EVOLUCION

4.1. Los sistemas evolutivos

En otros trabajos (PASK, 1958 y 1961a *y* b) hemos estudiado pormenorizadamente los sistemas evolutivos. Dicho brevemente, un sistema, Ξ, es evolutivo si se cumplen todas las condiciones siguientes:

1) Existe una partición de los estados de Ξ en los estados de unos subsistemas en evolución, Ξ_i, y en los del medio en que evolucionen (al que llamaremos medio interno para evitar confusiones).

2) Los organismos en evolución, Ξ_i, compiten por ciertos bienes limitados (alimentos, energía, variaciones, unos metabolitos específicos) que son necesarios para la supervivencia —podemos imaginar que la fábrica estructural del organismo decaerá a menos que este proceso quede contrarrestado por una actividad sintetizadora, y suponer que los organismos compiten por cualesquiera bienes que sean precisos para mantener tal actividad.

3) Los subsistemas Ξ_i de Ξ reproducen su propia organización para poder subsistir; y, por ello, cualquier subsistema o cualquier combinación acoplada de subsistemas es una organización. No nos vamos a ocupar de los mecanismos reproductivos especializados, tales como reproducción sexual; y no perdemos nada teniendo sólo en cuenta un proceso de reproducción, a saber: la interacción entre una estructura que se sintetice a partir de materia prima (en virtud de un proceso regidor) y esta misma actividad regida; así, pues, la actividad *inducirá* la estructura, en tanto que ésta implicará la organización que induce la actividad precisa para construir la estructura; y por ello se tendrá:

ESTRUCTURA $\rightleftarrows$ ACTIVIDAD.

4) La reproducción implica la formación de réplicas, con posibles variaciones ocasionales. Por lo regular existen muchas plantillas estructurales, L (que forman el conjunto $\mathscr{L}$), que inducen la *misma* actividad, $\mathscr{R}$, o una actividad *equivalente* (en el sentido de que pertenezca a un conjunto, $\mathscr{R}$, tal que todas las $R \in \mathscr{R}$ induzcan alguna $L \in \mathscr{L}$); por lo tanto, el mecanismo reproductivo se encontrará estabilizado por una redundancia de estructura y función, que estará representada por una aplicación multívoca de $\mathscr{L}$ en $\mathscr{R}$ y de $\mathscr{R}$ en $\mathscr{L}$. Dicho de otro modo, en cualquier mo-

mento, t, habrá una estructura determinada, $L_0 \in \mathscr{L}$, *que podrá inducir,* en el instante $t + 1$, cualquier $R \in \mathscr{R}$; y si suponemos que en $t + 1$ se induce R_0, en $t + 2$ podrá inducirse cualquier $L \in \mathscr{L}$:

y se tendrá, por término medio:

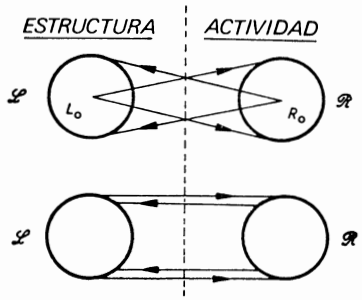


Fig. 2

El organismo que se reproduce es la aplicación $\mathscr{L} \rightleftarrows \mathscr{R}$ * y los elementos de estos conjuntos. Resulta cómodo denotarlo por G y escribir $L(G) \subset \mathscr{L}$ para cualquier componente *estructural,* y $R(G) \subset \mathscr{R}$ para cualquier componente *dinámico* del mismo.

No obstante lo cual, ni $\mathscr{L}$ ni $\mathscr{R}$ son invariantes: para ser exactos tendríamos que haber escrito $\mathscr{L}(\theta)$ y $\mathscr{R}(\theta)$, siendo θ función de los bienes necesarios para la supervivencia de las estructuras o para que se mantenga su actividad. Así, para $\theta = 1$ y $\theta = 2$ podrían haber surgido unas variantes, debidas a cambios de θ (cambios de $\mathscr{L}(\theta)$ y de $\mathscr{R}(\theta)$), a transformaciones aberrantes, como, por ejemplo:

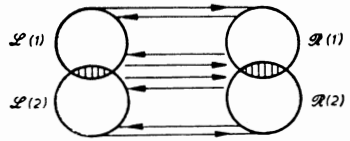


Fig. 3

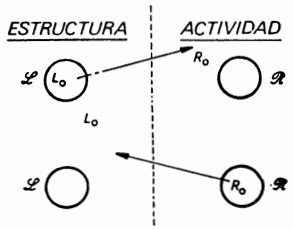


Fig. 4

o bien (de una manera que estudiaremos un poco más abajo) a alguna interacción entre un par de mecanismos reproductivos. Lo importante es que las variaciones constituyen la única *aleatoriedad* del sistema, y que

* Para simular una forma visible de G elegimos alguna característica, γ (tal como la distribución de la actividad en la totalidad del sistema) que dependa de la existencia de $\mathscr{L}$ y de $\mathscr{R}$ y que rija θ, de tal modo que la supervivencia de una organización esté condicionada a su satisfacer γ.

no guardan relación alguna con la aleatoriedad de tirar los dados o de efectuar conexiones fortuitas (que aparece en varios modelos adaptativos): la forma multívoca de $\mathscr{L} \rightarrow \mathscr{R}$ y de $\mathscr{R} \rightarrow \mathscr{L}$ no tienen nada que ver con el "azar", aun cuando pueda llevar a un observador a adoptar una imagen "probabilística" del sistema.

5) En el medio interno existen restricciones que favorecen el desarrollo de variantes específicas (en este caso, de un sistema auto-organizador cualquiera).

6) Entre estas restricciones hay algunas que favorecen la actividad mutuamente relacionada dentro de un conjunto de organismos formado en virtud de cierta comunicación entre los organismos de ese conjunto. (Se trata, en lo esencial, de la condición de BONNER, 1958, para los organismos multicelulares y las poblaciones organizadas.)

7) Existe una relación de identidad entre ciertos organismos, que define las especies de éstos.

8) Los organismos están "constituidos para sobrevivir", esto es, son homeostáticos y "ultraestables" (ASHBY, 1956) (se adaptan, haciendo máximo θ, de modo que se conserve la posibilidad de la homeóstasis en un medio interno cambiante).

4.2. Invariancia de una organización

La identificación del cerebro con un sistema tal como el Ξ conduce a una imagen en la que la computación que efectúe aquél será accesoria con respecto a la tarea básica, que es la de mantener la constitución corporal. Imagen que es sumamente razonable, ya que el rasgo más destacado del cerebro (o de cualquier otro montaje vivo) es que, a diferencia de lo que ocurre con las máquinas computadoras, no se lo puede "apagar": si quedase "apagado" accidentalmente, la estructura física decaería; y si la actividad metabólica fuese insuficiente, decaería también, aun cuando no de una forma tan impresionante (el metabolismo es, simplemente, la cara energética de un proceso reproductivo que conserva los organismos incluidos en el cerebro —al que consideramos como medio "interno", en el que éstos evolucionan— o la organización misma que llamamos "cerebro").

4.3. El origen de la indeterminación ligada al aprendizaje

En el interior de este marco [conceptual], la indeterminación de los mecanismos de aprendizaje tiene un origen muy plausible. Supóngase que las señales que, según admitimos, representan una información en un lenguaje operativo (α, digamos) se identifican en λ con los cambios de estado que constituyan la actividad constitutiva de un proceso reproductivo,

ESTRUCTURA $\rightleftarrows$ ACTIVIDAD.

La integridad de cualquier imagen informativa depende de que se mantenga la distinción entre las señales y sus transformaciones, o sea, de la existencia de una función de transferencia para la totalidad de la retícula o para un componente suyo, tal como la neurona; pero tal función de transferencia está determinada por la estructura; y, por otra parte, ésta se mantiene en virtud de un proceso reproductivo que entraña que existe el flujo de actividad a una parte del cual, al menos, estamos deseando llamar señales. De aquí que no sea posible aislar entre sí las señales y la actividad: sus índices son variables conjugadas. A ello se añade que la aplicación ACTIVIDAD $\rightarrow$ ESTRUCTURA y la aplicación ESTRUCTURA $\rightarrow$ ACTIVIDAD son multívocas; podemos llegar, pues, a una forma *parcial,* pero *internamente coherente,* de describir en λ_e un organismo, G, a base de una distribución probabilitaria sobre el conjunto de los componentes estructurales de G; mas para describir completamente la forma de la organización sería necesario tener acceso a una descripción en λ del tipo indicado en *3.2* y en el apéndice.

4.4. Identificación de muchos sistemas evolutivos en el cerebro

Es posible programar en una computadora sistemas evolutivos sencillos, para los que no sea difícil especificar una descripción completa MACKAY, 1958; PASK, 1959); pero un cerebro es un montaje físico que se identifica con un enorme número —acaso indefinido— de sistemas evolutivos distintos, y cada uno de ellos (o, en algunos casos, cada subconjunto de ellos) puede identificarse con un lenguaje operativo, α, β (en un sentido que vamos a aclarar dentro de un momento). Ahora bien, el proceso evolutivo del montaje no consiste en la evolución por separado de estos sistemas, sino que, por el contrario, se produce una interacción entre ellos —y cuando ésta acontece *dentro de* α o de β tiene el calibre de un flujo de información, en tanto que cuando tiene lugar *entre* α y β o entre β y α su calibre es el de una *identificación* (que, según la argumentación de este trabajo, es el proceso que distingue el aprendizaje de la adaptación).

5. LOS MECANISMOS FISICOS

5.1. Un modelo particular

El modelo que vamos a estudiar ha sido realizado físicamente, como artilugio (PASK y LEWIS, 1962). Sus constituyentes lógicos son un par de sistemas evolutivos acoplados en forma variable, dotados de un medio

interno común e identificados con unos lenguajes operativos, α y β, tales que los signos de α constituyan un atributo y los de β otro atributo del mismo acontecimiento físico (un impulso unitario o un potencial de acción); suponemos, además, que, ya sea por convención o por una ineludible necesidad conceptual, el observador se ve obligado a identificar el medio interno del sistema con una estructura rígida (que admitimos sea una retícula de neuronas reales o artificiales), y que quiere asignar unas ubicaciones definidas a los sucesos físicos y considerar como señal esta o aquella abstracción de tales sucesos. (Uno de los resultados de este método descriptivo es cierta indeterminación, que, evidentemente, tiene un origen más conceptual que fáctico.)

Por las ventajas que presenta, voy a identificar provisionalmente las partes del sistema con partes del cerebro, valiéndome de correspondencias que se apoyan en un par de hipótesis fisiológicas: en algunos respectos es plausible que el funcionamiento de este sistema se ajuste a lo que sucede en el cerebro, si bien el propósito principal de esta identificación es lograr una imagen muy vívida. (En realidad, 1) lo mismo podríamos haberlo identificado a un nivel sociológico o psicológico, y 2) la demostración o la refutación de aquellas hipótesis fisiológicas apenas puede tener efecto sobre el sistema, que es un modelo cibernético físicamente pertinente en virtud del comportamiento de un artilugio isomorfo con él.)

5.2. *El medio interno*

Asumimos ahora las condiciones de 4.2, algunas en una forma especializada. El medio interno es una retícula de neuronas maleables (o adaptativas), que denotamos con a y que pueden ser reales o artificiales (aunque en este último caso su diseño tiene que integrar ciertas características complicadas de las neuronas reales, características que desempeñarán un papel en el estudio). Podría admitirse una conexión total, pero sería impracticable; sin embargo, tiene mucha importancia que las neuronas se encuentren en grupos, denotados por A y dotados de una conexión cíclica por medio de fibras, dentro de los cuales compitan por unos bienes de los que será índice θ (en los cerebros reales la competencia por θ puede entrañar un mecanismo mutuamente inhibidor en el que *estén* involucradas fibras, puede depender de la difusión de un metabolito o deberse a la transferencia de metabolitos desde las células de la glía que rodeen las neuronas corticales).

Existen dos restricciones muy enérgicas:

I) toda región de la retícula está obligada a manifestar una actividad mínima, y su actividad máxima está restringida físicamente en forma que depende de θ (condición que garantiza que los mecanismos reproductivos neuronales estén "movidos" por una energía indiferenciada), y

II) toda neurona está obligada a mantener un nivel metabólico míni-

mo y se ve limitada a un nivel máximo, que depende de θ (condición que garantiza que los mecanismos reproductivos intracelulares estén "movidos" por una energía indiferenciada).

Recuérdese que θ constituye un índice de la velocidad a la que puedan sintetizarse y mantenerse las estructuras; pero vamos a ocuparnos, por una parte, de estructuras relativamente macroscópicas (cambios plásticos en las conexiones sinápticas) y, por la otra, de estructuras microscópicas (síntesis molecular); por lo cual las restricciones físicas de que es índice θ son muy diferentes en un caso y en otro.

Hemos señalado de nuevo en *4.2* el objetivo de la supervivencia y la posibilidad de la decadencia; no se trata de que *las neuronas* decaigan como tales, pero hay pruebas abundantes de que pueden volverse más o menos irreversiblemente olvidadizas, de que los cambios "plásticos" pueden literalmente decaer y de que cada especie molecular requiere, para conservarse, una síntesis específica.

Los acontecimientos físicos que aparecen en el medio interno son configuraciones de impulsos cuyos atributos espaciales son los signos de α, y los temporales, los de β.

5.3. Los sistemas memorizadores, los mecanismos del aprender y los organismos en evolución

Consideremos en primer lugar el sistema evolutivo durante un intervalo tan breve que apenas tenga ocasión de evolucionar: en esta imagen *relativamente* estática será posible estudiar la relación entre un sistema α y uno β, así como los procesos del flujo de información, de la computación y de la identificación.

Dentro de esta imagen, los organismos en evolución que luego identificaremos con mecanismos que aprenden aparecen en forma degenerada, como "mecanismos memorizadores" (esto es, sistemas que reproducen organizaciones a las que designamos con el nombre de "memoria") y cada organismo será un subsistema de uno de los dos sistemas evolutivos, el α o el β. (No pretendemos con ello que el cerebro real y verdadero tenga solamente dos sistemas: probablemente posee un númro indefinido de ellos; pero dos es el número mínimo que se necesita para que puedan manifestarse los principios indicados.)

5.4. El sistema α

Atribuimos un lenguaje operativo, α, a un sistema evolutivo semejante a la estructura de resonancia estudiada por PRINGLE (1951); atribución que, naturalmente, tiene que justificarse posteriormente escrutando la relación existente entre este sistema y otros distintos, para cerciorarse de que realmente define la relación entre el lenguaje α y otros lenguajes.

Los organismos en evolución se reproducen mediante la interacción entre una configuración de actividad, espacialmente distribuida por la retícula oscilatoria neuronal, y una plantilla estructural consistente en modificaciones plásticas de las sinapsis de algunas de las neuronas, *a*, del grupo *A* (por ejemplo, de las neuronas a_1^1 a_2^1 ... a_{n1}^1 del grupo A_1). Teniendo en cuenta la condición de ser movidas de *5.2*, la actividad reinante en las neuronas de A_1 dependerá, si no se reciben impulsos de otro grupo, A_2, de la plantilla estructural de A_1; y cualquier configuración que perdure dependerá de un equilibrio dinámico logrado por el mecanismo reproductivo:

configuración de impulsos $\leftrightarrows$ cambios plásticos.

Denotamos por G_i^α el organismo que se reproduce, *G*, que es una relación entre la configuración de impulsos y los cambios plásticos (el supraíndice alude al lenguaje operativo y el subíndice vale como medio de identificación.)

Tenemos la equivalencia $G_i^\alpha \equiv \mathscr{L}_i^\alpha \rightleftarrows \mathscr{R}_i^\alpha$; luego G_i tiene como componentes *dinámicos* los $\mathrm{R}(G_i^\alpha) \subset \mathscr{R}_i^\alpha$, que no están localizados en la retícula, y los componentes *estructurales* $\mathrm{L}(G_i^\alpha) \subset \mathscr{L}_i^\alpha$, que *sí* están localizados: a saber, dentro de la región A_1 de la retícula.

Las neuronas de A_1 están enlazadas, mediante fibras paralelas, a otras regiones, tales como el grupo $A_2 = a_1^2, a_2^2, \ldots a_{n2}^2$; y puesto que todo componente dinámico, $\mathrm{R}(G_i^\alpha)$, consiste en una configuración de impulsos, puede ser transmitido por este agrupamiento de fibras paralelas a A_2.

Ahora bien, según sea el estado de A_1 (esto es, según qué G_i^α esté siendo reproducido en A_1), tales impulsos pueden inducir en A_2 algún L_i^α, y, luego, G_i^α; y por ello decimos que $\mathrm{R}(G_i^\alpha)$ es un signo de G_i^α en α —si bien no será ni necesaria ni usualmente un signo único de G_i^α—. Por tanto, los organismos de α pueden ser reproducidos en un lugar dado o transmitidos, mediante sus componentes dinámicos, de suerte tal que induzcan un mecanismo remoto reproductivo del organismo que sea: los signos son los componentes dinámicos de los organismos y constituyen el *atributo* de la configuración *espacial* de ciertos acontecimientos físicos.

Así pues, como consecuencia de describir en λ el medio interno como una retícula, y de distinguir en él un sistema α:

I) todos los organismos G_i^α de α están ligados a un mecanismo reproductivo, que en cualquier instante está localizado en forma definida en cierto grupo de neuronas, A_1;

II) los signos de α son componentes dinámicos, $\mathrm{R}(G_i^\alpha)$;

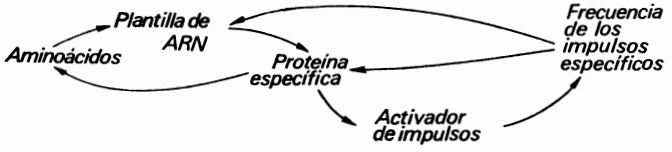
III) el conjunto de signos de α está determinado por el atributo de la configuración espacial de las secuencias de impulsos físicos, y

IV) sólo los signos de α tienen "significado" (o sea, un efecto opera-

tivo definido en α), y se los transmite mediante acoples en α de una capacidad apropiada (de fibras paralelas).

5.5. *El sistema β*

Vamos a atribuir un lenguaje operativo, β, a un sistema evolutivo tal como el propuesto por HYDÉN (1960) como mecanismo memorizador basándose en sus experimentos sobre los cambios de concentración de ARN en las neuronas estimuladas (POLONSKI, 1961, y BARBIZET y ALBARDE, 1961, han indicado unos mecanismos análogos). Suponemos que la frecuencia —u otro atributo comparable a éste— de una secuencia temporal de impulsos es capaz de modificar algunas de las moléculas de ARN producidas por una neurona de modo que se sintetice una molécula de proteína modificada del modo correspondiente; y vamos a suponer, además, que esta proteína modificada (de que sólo dispondrán las neuronas que hayan recibido previamente un estímulo de aquella frecuencia) será específicamente sensible a dicha frecuencia de estimulación, disociándose —para producir acetilcolina o algún otro activador— en caso de que le llegue de nuevo. Por lo tanto, ciertas neuronas tendrán incorporados unos "receptores específicos" (a los que denotaremos con b) de unas frecuencias específicas de las secuencias de impulsos; y puesto que la frecuencia queda representada por una modificación de la síntesis de ARN, una neurona, a, puede llevar en sí un número enorme de receptores "específicos", $b(1)$, $b(2)$, ... $b(m)$, correspondientes a distintas frecuencias. Por consiguiente, los signos de β son frecuencias —o atributos temporales— de secuencias de impulsos, y, en particular, un signo de β es aquella frecuencia capaz de inducir un receptor específico, b. El organismo G_i^β de β se conserva en virtud de un mecanismo reproductivo, que, recordando el principio de ser movido de *5.2*, se representa por el doble ciclo



que podríamos formular así:

$$G_j^\beta \equiv \mathscr{L}_j^\beta \leftrightharpoons \mathscr{L}_j^\beta \leftrightharpoons \mathscr{R}_j^\beta$$

el cual, a su vez, puede reducirse a

$$G_j^\beta \equiv \mathscr{L}_j^\beta \leftrightharpoons \mathscr{R}_j^\beta$$

si tenemos en cuenta el hecho de que los componentes estructurales, L (G_j^{β}), se perpetúan automáticamente (debido a la persistencia de la modificación del ARN) y que, en consecuencia, lo más probable es que queden distribuidos (pues cualquier neurona que posea un receptor específico lo retendrá con un mínimo de reforzamiento por impulsos oscilatorios). De aquí que, probablemente, la ubicación en la retícula del componente estructural de G_j^{β} en un instante cualquiera sea un conjunto de receptores específicos,

$$B_j = \left[b_1^1(j), b_2^1(j) \ldots\ldots \ldots b_{n1}^1(j); b_1^2(j), b_2^2(j) \ldots . b_{n2}^2(j); \ldots \right],$$

que será enorme.

Así pues, como consecuencia de describir en λ el medio interno como una retícula, y de distinguir en él un sistema de β,

I) todos los organismos G_i^{β} de β están ligados a un mecanismo reproductivo, que está distribuido (por estarlo sus componentes estructurales y dinámicos), ya que se encuentra sólo ubicado en un conjunto, *B*, dotado de receptores específicos, *b*, en la mayoría de las neuronas;

II) los signos de β son componentes dinámicos, R (G_i^{β});

III) el conjunto de signos de β está determinado por el atributo de la frecuencia de todas las secuencias de impulsos físicos, y

IV) sólo los signos de β tienen "significado" —o sea, un efecto operativo definido— en β, y se los transmite por cualesquiera acoples en β que constituyan una fibra de una capacidad apropiada (teniendo en cuenta la limitación de frecuencias).

5.6. *La identificación entre los sistemas α y β*

Los acontecimientos físicos constituidos en λ por unas secuencias de impulsos distintas tienen un aspecto α y otro β; además, aun cuando ningún signo de α tiene "significado" en β, cualquier secuencia de signos de α implica cierta frecuencia de unos impulsos que se producirán en algún punto de la retícula, y que puede ser un signo de β (y, casi con seguridad, lo será sin más que elegir del modo apropiado los parámetros). Por consiguiente, el flujo de signos de α engendra signos de β, pero cada uno de estos últimos —que será una frecuencia— engendrado por una actividad de α dada será, normalmente, distinto en puntos distintos de la retícula; y, a la inversa, muchos modos diferentes de actividad de α inducirán en un punto dado el mismo signo de β.

Los signos han perdido la propiedad de ser señales, y se encuentran en relación más cercana con los *perceptos* de GREENE.

Hemos razonado, pues, que existe una aplicación peculiar, dependiente

de la ubicación y multívoca, de α en β; e, inversamente, puesto que cualquier conjunto de frecuencias induce una distribución espacial, existe una relación comparable de β a α.

El punto ahora más importante es que resulta suficientemente justificada la atribución que habíamos hecho de los lenguajes operativos α y β a un par de sistemas evolutivos, puesto que la relación existente entre α y β es exactamente la relación multívoca, indeterminada en λ y dependiente del organismo de que habíamos tratado en *3.3*. En este razonamiento hay un punto dudoso, que es la propiedad de ser dependiente del organismo; para hacerlo patente, adviértase que la frecuencia inducida (como signo de β) por una secuencia de signos de α dependerá de la posición en la retícula en la que se especifique aquel signo de β; y, análogamente, la configuración de impulsos inducida (como signo de α) por una colección de signos de β dependerá del conjunto de puntos que se especifiquen como receptores. Mas, por otra parte, la relación entre lenguajes operativos que, según afirmamos, depende del organismo es la "traducción" (o "identificación de secuencias de signos"); y como cualquier organismo de α tiene un componente estructural localizado, la dependencia de la posición garantiza que se presentará esta propiedad en toda traducción $\beta \rightarrow \alpha$; sin embargo, todo organismo de β tiene un componente estructural distribuido, y, por ello, la propiedad dicha será aplicable para las traducciones $\alpha \rightarrow \beta$ (excepto, posiblemente, en el caso de un organismo de β completamente distribuido).

La identificación aparece en nuestro sistema como un proceso mediante el cual un conjunto de signos de β llega a "significar lo mismo para" cierto organismo de α (digamos G_i^α, situado en una región A_1) que un signo de α dado —digamos $\mathrm{R}(G_j^\alpha)$— que sea un componente dinámico de un organismo de α, G_j^α, situado en una región A_2. La expresión "significar lo mismo para" G_i^α implica que, en una descripción en λ, se induce el mismo cambio de estado por una secuencia de signos de β que la que fuese inducida previamente —o se esté induciendo a la vez— por el signo de α $\mathrm{R}(G_j^\alpha)$. Dicho de otro modo: una transformación tal como

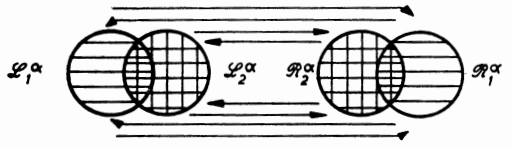


Fig. 5

o bien se induce por un signo de α o por un conjunto de signos de β que anteriormente no era comparable con aquel signo; y lo mismo es aplicable a la identificación en β de un signo de α.

6. LA EVOLUCION DE LOS ORGANISMOS

6.1. Los organismos como seres que toman decisiones

En la imagen relativamente estática en que nos hemos fijado hasta ahora, un grupo de neuronas, A_1, digamos, actúa como sistema que toma decisiones; el cual, en un instante determinado, se parece a un autómata finito dotado de una función de transferencia determinada por G_j y realizada como un objeto en el sentido de *3.2* y *3.3*, por ejemplo, así:

$$F;(X_1^{\alpha} \otimes Y_1^{\alpha}) \rightarrow Y_1^{\alpha}$$

siendo X_1^{α} el conjunto de signos de α detectable en las fibras de entrada de A_1 e Y_1^{α} el de signos de α detectable en las fibras de salida de A_1.

Pero importa mucho recordar que la sustancia del organismo es el proceso productivo de G_j^{α}, y no las neuronas concretas que de hecho median en esta organización: el organismo se asienta en A_1 y utiliza las neuronas allí situadas a modo de cuerpo suyo, tal vez sólo por un momento, tal vez indefinidamente (la condición de agrupamiento de *5.2* garantizaba cierto número de posiciones en la retícula de neuronas en los que podrían asentar cómodamente los organismos). De modo que, si $\rightarrow\!\!-$ implica una conexión mediante fibras, ... una dependencia de θ y $\circ$ una neurona, una estructura factible, *A*, sería:

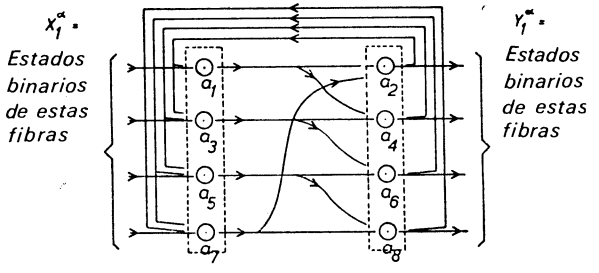


Fig. 6

y todo organismo de α es una organización en la que se encuentran bucles tales como $a_1 \leftrightarrows a_2$ o $a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_3 \rightarrow a_6$, así como cambios plásticos en las sinapsis de las neuronas correspondientes.

Sin embargo, las neuronas de A_1 son también mediadoras de partes de organismos de β, puesto que cada neurona puede incorporar en sí varios receptores específicos, *b*. También podríamos, pues (si bien ello tiene me-

nos interés práctico), definir un autómata en β. distribuido y dotado de la función de transferencia

$$F; (X_B^\beta \otimes Y_B^\beta) \rightarrow Y_B^\beta$$

siendo X_B^β el conjunto de signos de β que aparezca en todos los $b \in B$, e Y_B^β el de signos de β producido por las neuronas, a, que lleven dentro de sí estos receptores específicos.

Desde el punto de vista del ingeniero, cabe mirar cualquier neurona como un mecanismo de doble finalidad dotado de cierto número de partes funcionales (fig. 7).

Las fibras de entrada aportan impulsos, cuyo componente espacial se filtra mediante un filtro de α (una innovación plausible sería una entrada de θ a este elemento), con lo que se hace aparecer una decisión en α

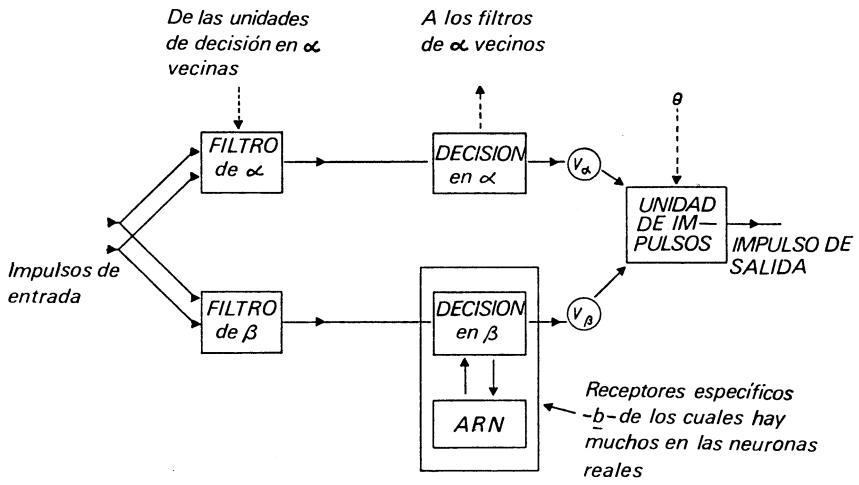


Fig. 7

(según es plausible, un cambio de estado que ejerza cierto efecto, referente a θ, sobre los filtros de α vecinos). También se filtran los impulsos de entrada en un filtro de β para extraer su componente frecuencial, y dan así lugar a una decisión en β, que involucra un receptor específico (representado por una pareja de elementos acoplados). La neurona produce un impulso de salida que puede formar parte o de un signo de α o de uno de β, y la decisión de emitirlo depende del peso valorativo que se atribuya a las decisiones en α y en β (V_α y V_β respectivamente).

6.2. *La interacción entre los organismos en evolución*

Por lo tanto, cualquier colección de neuronas es potencialmente lugar de ubicación de un organismo de α o de β, si es que toma parte en un proceso reproductivo de α o de β, respectivamente. (El elemento común a ambos procesos es un impulso que constituye el *suceso* físico al que detectamos en λ como *signo*.)

Supongamos que tenemos unos testimonios empíricos que indiquen que cierto grupo de neuronas *es* el punto de ubicación de un organismo de α; podremos producir una interacción con éste en el lenguaje operativo α introduciendo unos estímulos y unos electrodos registradores, y poniendo en correlación la característica espacial (o signo en α) de su entrada con cualesquiera estímulos espacialmente configurados que introduzcamos (figura 8).

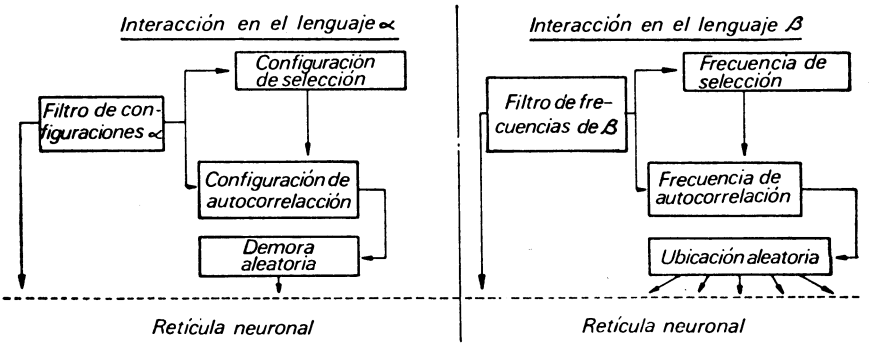


Fig. 8

En cualquier momento, cualquier neurona puede constituir en mayor o menor medida parte de una organización de α o de β: su condición a este respecto es principalmente función de V_α y V_β (que, sin embargo, hemos de suponer que son variables). Ahora bien, hemos afirmado ya que una neurona es —en cierto sentido restringido— un dispositivo maximizador * de θ, y no introducimos innovación alguna al hacer observar que, si es que existen los nítidos elementos dibujados (lo cual no ocurre, en cualquier caso, con las neuronas reales), una de las adaptaciones que maximizarían θ sería una variación de V_α y de V_β.

Supongamos, pues, que causamos una interacción en α con el grupo de neuronas de la región A_1 valiéndonos de una función de correlación tal

* Adviértase que por *maximizar* se entiende ordinariamente «hacer lo mayor posible (en las circunstancias del caso)», y *no* «hacer que se alcance el valor máximo (ya dado)»; sin embargo, el autor emplea este término más bien en el sentido de *mayorar*, o sea, de «hacer que se llegue a algún valor mayor que uno previamente dado» (el que sea justo suficiente para la supervivencia). *(N. del T.)*

en el bucle de realimentación externa que θ *quede* maximizado (y si no lo hacemos, la interacción no podrá mantenerse); entonces induciremos a las neuronas de A_1 a aumentar V_α y a comportarse como parte de un organismo de α. Y cosa semejante es aplicable en caso de una interacción estable de β (maximizadora de θ), situación en la que se inducirá a las neuronas de A_1 a comportarse como parte de un organismo de β.

Este es el dilema de cualquier método *dialogador* [*conversational*] de observar un sistema; pero, a menos que se estabilicen definitivamente o la interacción en α o la interacción en β, los organismos del sistema poseerán aspectos de α y de β. Podemos lograr de nuevo la determinación, y la posibilidad de estar seguros de lo que implique un signo, hablando, según lo hemos hecho, de que un organismo de α *identifica* el componente dinámico de un organismo de β como signo de β, o viceversa; pero este expediente presenta un valor muy dudoso siempre que sea necesario admitir interacciones estructurales en α y en β. De hecho, los organismos más corrientes son híbridos lingüísticos; y ésta es la razón por la que es difícil observar al sistema de otro modo que el dialogador: esto es, pasando de α a β siempre que sea necesario, con objeto de conservar el hilo del discurso.

6.3. *Un sistema auto-organizador*

En 5.2 hemos definido el medio interno de modo que encarnase un conjunto de restricciones que favoreciesen la evolución del organismo en caso de que fuese un sistema auto-organizador; dicho de otro modo, sólo un sistema de esta última índole recibiría una cantidad suficiente de θ.

Pensemos en un ser que tome decisiones, en el sentido del estudio anterior. Se tratará de un sistema auto-organizador si y solamente si la velocidad de variación de la redundancia de su comportamiento es positiva; a saber, si y sólo si Δ redundancia de $(x, y)/\Delta t > 0$.

En un medio interno variable, un sistema adaptativo maximizador de θ puede comportarse como sistema auto-organizador del modo indicado: la adaptación llevará a una función de transferencia que maximice θ, pero antes de que ocurra tal cosa el medio se modificará, con lo que se necesitará otro tipo de modificación adaptativa; así pues, en cierto sentido, el sistema está siempre adaptándose, y la redundancia de los efectos pertenecientes al orden del comportamiento aumenta siempre, por término medio.

Este análisis es sugestivo, pero espúreo, ya que estriba en una nueva definición del conjunto X, y, por tanto, en definir de nuevo el "sistema" (BEER, 1961). En efecto: *dado* un conjunto X (a saber, en un medio invariante o estacionario), el sistema —cuyos efectos en el orden del comportamiento serán $X \otimes Y$— se adaptará de tal suerte que maximice θ; la redundancia aumentará durante cierto tiempo, pero acabará por ser cons-

tante, punto a partir del cual el sistema ya no se comportará como si fuese auto-organizador, y no se encontrará favorecido con un valor adecuado de θ. Mas, puesto que la estructura física del organismo depende de θ, tiene que *convertirse en* un sistema auto-organizador para poder sobrevivir.

6.4. *El mecanismo de la evolución*

Para convertirse en un sistema auto-organizador, es preciso que el dominio de la función de transferencia —que es un conjunto de resultados del orden del comportamiento, $X_1 \otimes Y_1$— se transforme según $(X_1 \otimes Y_1) \rightarrow (X_2 \otimes Y_2)$, o sea, según $(X_1 \otimes Y_1) \rightarrow T(X_1 \otimes Y_1)$, estando T definida como una transformación que conserve

$$\Delta \text{ redundancia de } (x, y)/\Delta t > 0;$$

o bien, cosa equivalente, escribiendo una Ξ y una $T(\Xi)$ que conserven

$$\Delta \text{ redundancia de } (\Xi)/\Delta t > 0.$$

Por lo tanto, aunque no hay sistema alguno con dominio invariante, Ξ, que pueda ser un sistema auto-organizador *estable,* la adyunción [*disjunction*] Ξ^*, siendo

$$\Xi^* = \bigcup_{r=0}^{r=R} [T^r(\Xi)], \text{ siendo } r = 1, 2 \ldots\ldots\ldots R,$$

es un sistema auto-organizador estable (si es que existe).

Llamamos a Ξ^* la evolución de Ξ, y añadimos que su existencia está garantizada por las restricciones o ligaduras físicas existentes en retículas tales como la de CAIANIELLO (1961). Pero la evolución puede ser de dos tipos:

1) El conjunto de *estados* de la resultante en el orden del comportamiento se transforma o evoluciona, debido a la actividad de un conjunto mayor de neuronas: en este caso el organismo de α se dilata hasta ocupar una extensión mayor de la retícula. El mecanismo de la evolución consiste en la transmisión de signos de α (a partir de A_1, digamos, a un grupo de neuronas que albergue una actividad similar, tal como A_2): se produce una resonancia entre el organismo ubicado en A_1 y A_2, con lo que se llega a un sistema cuyos estados resultantes son $(X_1^\alpha \cup X_2^\alpha) \otimes (Y_1^\alpha \cup Y_2^\alpha)$. Vamos a denominar a este tipo *evolución regional.*

2) El conjunto de *estados* de la resultante en el orden del comportamiento se transforma por inclusión de estados de β, con lo cual el organismo se vuelve *capaz,* en forma equivalente, *de identificar signos de* β, o sea, *un híbrido de* α *y* β (y hasta, en el caso límite, un organismo decididamente de β). El mecanismo correspondiente consiste en una modificación de los pesos valorativos de las neuronas, V_α y V_β (un aumento de

$V_\beta/V_\alpha + V_\beta$), de las cuales sólo algunas se encontrarán, ordinariamente, en el grupo A. El organismo resultante poseerá un conjunto de resultados del orden del comportamiento $(X_1^\alpha \cup \Omega(X_B^\beta)) \otimes (Y_1^\alpha \cup \Omega(Y_B^\beta))$, pero esta aserción apenas tiene valor práctico, ya que lo probable es que X_1 y X_B e Y_1 e Y_B estén vinculados a neuronas enteramente distintas. Se trata, sin embargo de un *proceso* que sí *es* importante, y al que llamaremos *evolución lingüística.*

6.5. La necesidad de la evolución

No presenta dificultades hacer ver que si se abandona a sí mismo el sistema evolutivo, los organismos evolucionarán en sentido regional, como se ha indicado en 1), o en el de la evolución lingüística de 2). No vamos a exponer la argumentación correspondiente en este trabajo, pero sí señalamos que este resultado es una consecuencia del principio general de que en un medio interno existirá un organismo en evolución cada vez más determinado por los demás organismos de su propia especie.

6.6. El aprendizaje en relación con la evolución

Vamos a sostener más adelante, en *8.1* y *8.2,* que la evolución de un organismo, ya sea regional o lingüística, posee las características que se necesitan en los mecanismos que median en varios tipos de comportamiento de aprendizaje. Mas, antes de desarrollar este punto, es conveniente estudiar un caso próximo, que permite ver claramente la enorme generalidad de este proceso.

7. DIGRESION SOBRE MONTAJES FISICOS

7.1. Cómo se resuelve un problema insolventable [undecidable]

Pensemos en un autómata capaz de recibir datos procedentes de un conjunto de posibilidades, E, y de elegir acciones de otro conjunto de posibilidades, C. Supongamos que su supervivencia física dependa de θ, y programémoslo para que maximice el θ de que disponga en su medio valiéndose de la función de transferencia f; $(E \otimes C) \rightarrow C$ (a la que suele darse el nombre de regla de solvento); Supongamos ahora que se le presente un problema insolventable; dicho de otro modo, que, dados ciertos datos, $e_0 \in E$, y una vez elegida $c_0 \in C$, la regla de solvento no especifique cambio alguno de estado que aumentase θ; e_0 permanecerá invariable, y, al mantenerse en e_0, c_0, el valor de θ irá disminuyendo: si no se especifica nada más, el autómata es incapaz de sobrevivir, tiene que permanecer en e_0, c_0 hasta que se produzca su completa decadencia.

Los organismos que hemos examinado son, momentáneamente, como el autómata: la estrategia de que disponen para evitar una situación insolventable y destructiva es la de *evolucionar,* pasando a ser otro organismo que *pueda* ser capaz de resolver el problema.

Podría proyectarse asimismo el autómata de forma que tuviese también esta estrategia, caso en el que su respuesta a una situación insolventable y destructiva sería $E \rightarrow E^*$, $E \subset E^*$ (o sea, conseguir nuevos datos sobre cuya base decidir) o bien $C \rightarrow C^*$, $C \subset C^*$ (esto es, elegir unas acciones nuevas, con objeto de elicitar más datos). El hecho de que la mayoría de los autómatas no estén proyectados de este modo se debe a la índole de los datos que ordinariamente se les hace llegar, a saber: los valores de una variable continua o de un número limitado de ellas. Es preciso aumentar el conjunto de posibilidades si se quiere resolver el problema, pero cuando el medio posee esta estructura especial cabe invocar la doctrina de los *sucesos azarosos,* lanzar un dado y elegir así *al azar* en el conjunto que haya de posibilidades —pues éstas definen completamente el medio.

7.2. *El solvento en un equilibrio inestable*

Reduzcamos la situación de elección a su forma más rudimentaria: a una bola en equilibrio sobre un vástago y capaz de caer en diversas direcciones. Supongamos que la punta del vástago se hace cada vez más estrecha, con lo que el equilibrio será más y más inestable.

Esta rudimentaria situación es "insolventable", en el sentido de que en cualquier momento en que la bola repose sobre el vástago no hay nada que la "predisponga" a caer en una dirección con preferencia a cualquier otra (si no fuese así se hubiese caído ya). Finalmente, al ir estrechándose el vástago, la bola se vendrá abajo, y entonces suponemos que se la colocará de nuevo y que el proceso se repetirá.

Podemos describir el acontecimiento del venirse abajo de dos modos distintos:

1) Como un suceso determinado por alguna variable física o combinación de ellas, tal como un leve movimiento del aire o un campo magnético. A medida que el vástago se vaya haciendo más delgado, el número de variables que ejercerán un efecto sobre la bola que baste para determinar su derrumbe irá aumentando; por ello, el estrechamiento del vástago produce el efecto de aumentar el conjunto de variables significativas, esto es, de las que determinen en forma significativa el resultado que se obtenga (cuyo número es *indefinidamente* grande).

2) Como algo debido al azar, en caso de que desconozcamos las variables determinadoras o nos sean indiferentes.

Por lo común, tanto 1) como 2) son aceptables. Pero es evidente que sería esencial emplear la primera descripción, y no la segunda, si la bola

pudiera, de la forma que fuese, sacar provecho de caer en una dirección (*X*, digamos), si al ser empujada por las corrientes de aire, siendo el vástago menos estrecho (y, por tanto, el sistema más estable), se determinase su caída hacia *X*, y si, como resultado, la bola se adaptase, haciéndose más sensible a los movimientos del aire que a las demás variables. (Este proceso adaptativo es diferente de las adaptaciones que seleccionan un "valor de la variable", tal como "la fuerza de las corrientes de aire", que también podrían presentarse.)

En la evolución biológica tiene lugar una selección parecida, esta vez de entre los estados de un número indefinidamente grande de las variables posibles; selección que determina, por ejemplo, las modalidades sensoriales del organismo. Pero, frente a ello, en el sistema evolutivo que hemos considerado se efectúa la selección (trivialmente) a partir de formas descritas en un número indefinidamente grande de posibles lenguajes, y lo mismo ocurre (no trivialmente) durante la maduración de los cerebros biológicos.

Nos encontramos ahora en condiciones de poder poner en relación las entidades del sistema evolutivo con los mecanismos de aprendizaje, y ello de una forma verdaderamente muy general —como hemos hecho ver toda la diversidad de sistemas en que tales principios pueden encarnarse, ya no necesitamos limitar la atención a un par de lenguajes operativos—. Cuando el sistema evolutivo se realiza en un montaje físico, posee una propiedad "analógica" sumamente especial e importante (MACKAY ha señalado otros sistemas dotados de una propiedad muy parecida): nos hemos acostumbrado a dispositivos analógicos que seleccionan a partir de un número indefinido de valores de una variable (entonces el dispositivo trabaja con variables continuas), pero el sistema evolutivo realizado físicamente selecciona a partir de un número indefinido de variables o de lenguajes operativos.

8. LOS DISTINTOS TIPOS DE APRENDIZAJE *

8.1. Formas del mecanismo del aprender

El caso límite de un mecanismo de aprendizaje es un sistema cualquiera que tenga propiedades adaptativas.

Estas constituyen un requisito previo al aprendizaje y a la evolución. Fijémonos en el discurso en α dentro del sistema evolutivo de que nos hemos estado ocupando, y supongamos que el organismo (o conjunto de organismos) que intervenga en la vía de realimentación de los signos de dicho discurso se encuentra en condiciones tales que, o bien *1)* tiene que

* Véase también el apéndice.

evolucionar para poder sobrevivir, o *2)* ya no es un sistema auto-organizador estable, o *3)* se le presenta un problema insolventable, o bien *4)* es inestable al modo de la bola sobre el vástago; en una cualquiera de estas situaciones equivalentes se producirá una evolución, que se manifestará en el discurso en α en forma de un comportamiento de aprendizaje.

Si tiene lugar una evolución *regional,* los comportamientos posibles son generalizaciones de estímulos o respuestas, o bien la constitución de un acervo de experiencia relativa a éstos; ahora bien, los conocimientos podrían acumularse a base de órdenes distintos de probabilidades condicionales de sucesos o de las construcciones teoréticas ya existentes, pero no pueden presentarse otras organizaciones distintas de las afirmadas [*predicated*] en el sistema α, y, por ello, no pueden surgir ningún concepto ni relación esencialmente nuevos (pues incluso las variaciones del sistema que podrían interpretarse como aprendizaje por ensayos al azar inducirán unos organismos afirmados en este sistema). Dicho brevemente, el proceso de la evolución regional implica, entonces, un mecanismo que puede dar cuenta del aprendizaje inductivo y —ampliando el modelo hasta incluir la selección de respuestas— de la inferencia inductiva en el sentido de BRAITHWAITE (1962) y de POPPER; asimismo puede dar razón de los cambios de la atención dentro de un campo formado por objetos ordenados de manera parecida. La aparente indeterminación entrañada en el proceso del aprender se debe a la intrusión de signos de β (o sea, al híbrido carácter de los organismos en evolución), la cual es asimismo, en muchos sistemas, el principal progenitor de variaciones.

Si se produce una evolución *lingüística,* el comportamiento que de ella resulte podrá manifestar originalidad con tal de que el sistema sea concebible para quienquiera entre en el discurso. Los signos de α se identifican con un conjunto de signos de β, y viceversa; pero el nivel evolutivo al que se considerará que tal *identificación* tiene lugar dependerá de la discriminación que *éste* [ser parlante] haga, y carece, por lo demás, de toda delimitación con respecto a la interacción híbrida que se pase por alto como carente de importancia. Así pues, por emplear una analogía bastante insuficiente, en cierto nivel evolutivo, algunos signos de α que se presentaban en el discurso como "evaluados nebulosamente" adoptarán unos "valores tajantes", como signos de α identificados con conjuntos de signos de β.

El mecanismo de la evolución lingüística puede dar origen a conceptos y relaciones nuevos; por ejemplo, las relaciones involucradas en la construcción de la jerarquía intelectual de las estructuras hipotético-deductivas (en el sentido de BRAITHWAITE y POPPER); puede dar razón de que se preste atención a objetos o entidades con los que antes no se guardase relación alguna; y, por fin, una de las consecuencias en el orden del comportamiento de tal sistema es el percatarse. Es fácil que el flujo del discurso en α experimente una aplicación o correspondencia en la inter-

acción de los organismos de β (o tal vez es seguro que la experimentará); y allí permanecerá en forma de representación en β inaccesible, "evaluada nebulosamente", hasta que tenga lugar una evolución lingüística, los conjuntos de signos de β queden identificados con signos de α y lleguen a estar "evaluados tajantemente"; pero, antes de que tal cosa ocurra, los datos pueden haber quedado modificados en su representación en β, y en tal caso diríamos que tal identificación hacía percatarse de algo. Así pues, y de acuerdo con los criterios que hemos indicado desde el principio, en este sistema el aprendizaje entraña la evolución lingüística.

8.2. La relación entre organizaciones

Como conclusión hemos de subrayar los caracteres físicos de este sistema. Es posible que hayamos insistido el suficiente número de veces en que todo organismo está constituido para sobrevivir como entidad física, que sus "decisiones" se efectúan con objeto de conservar su fábrica corporal y que la abstracción θ es sólo un índice cómodo de cualesquiera condiciones energéticas se necesiten para conservar y construir tal fábrica; y bastan estas solas razones para que la forma del organismo que evolucione tenga que depender del montaje físico en que esté encarnado el sistema evolutivo (sin esta dependencia material * nuestras conclusiones quedarían limitadas a sistemas que sólo *tuviesen,* literalmente, un lenguaje α y uno β).

Pero el carácter físico del sistema desempeña un papel igualmente importante en la determinación de las relaciones —en particular, las semejanzas— que existan en su interior y en la conservación de una correspondencia entre ellas y las relaciones pertenecientes a un medio externo formado con idéntico material (MacKay, 1958; Beer, 1961).

Cuando se tienen en cuenta los organismos en evolución existen ciertas relaciones entre los individuos y sus antepasados, así como entre las especies (que son las exigidas en *4.4* y realizadas por las restricciones o ligaduras materiales); y a ellas corresponden relaciones entre las formas del signo en un lenguaje operativo dado y entre varios de estos últimos; relaciones que, en el caso de α y β, se hallan realizadas físicamente por las existentes entre configuraciones espaciales *o* entre frecuencias y por relaciones entre configuraciones espaciales *y* frecuencias. En el discurso existen también, por fin, relaciones entre conceptos de la misma índole y entre los de distinta índole.

La dependencia material de los cerebros y de los artilugios hace pensar que la experiencia manifiestamente coherente procede de un medio físico

* La abstracción apropiada a semejante sistema materialmente dependiente es un autómata infinito, tal como, por ejemplo, el estudiado por Loefgren en un trabajo reciente. (Nuestros organismos en evolución son casos especiales y bastante inmanejables, de autómatas infinitos.)

o intelectual dotado de cohesión, del cual el cerebro constituiría una parte especializada.

APENDICE

Observaciones sobre los algoritmos

Durante la discusión, el profesor RASHEVSKI ha sugerido que podría sacarse partido de la teoría markoviana de algoritmos para el modelo del aprendizaje. Vamos a bosquejar un enfoque provisional, ya que tal método parece prometedor.

Podemos interpretar un algoritmo cualquiera como un procedimiento de cálculo dotado de integridad conceptual; de modo que, en cierto sentido, Ξ podría revelar los algoritmos que emplee sin dejar de ignorar las etapas de su aplicación (aun cuando cada etapa entrañará algún cambio mecánico). Concibiéndolo de esta manera, un algoritmo es un proceso que reduce la incertidumbre conceptual de Ξ (dados x e y, así como el x correspondiente al próximo y).

Los algoritmos, η, actúan sobre un vocabulario que consiste en cierta representación secuencial, τ, de X^α, y dan así lugar a palabras de $\tau(X^\alpha)$ —o, si no, a palabras de $\tau(Y^\alpha)$—. Dado (x_0, y_0), Ξ selecciona cierto algoritmo, $\eta \in E(\varphi)$; y todo $\eta \in E(\varphi)$, o bien I) satisface la función f_φ seleccionada en tal instante a partir de F^α (en el sentido de que $\eta(\tau(x_0)) = f_\varphi(x_0, y_0)$; $x_0 \in X^\alpha$, $y_0 \in Y^\alpha$), o II) es el primer miembro de una sucesión finita de m algoritmos

$$\eta_m \{\eta_{m-1}[\ldots\ldots\eta_\gamma \quad [\tau(x_0)]\ldots.]\} = f_\varphi(x_0, y_0)$$

siendo cualquier

$$\eta_\gamma [\tau(x)] \in \tau(X^\alpha \cup Y^\alpha) \quad \text{para} \quad m \geqslant \gamma \geqslant 1.$$

Vamos a considerar la incertidumbre "conceptual" apoyándonos en el promedio, $\nu(\varphi)$, del número de algoritmos que se necesiten por Ξ, dados x_0 e y_0, para satisfacer $f_\varphi \in F^\alpha$. Dicho de otro modo, interpretamos la longitud media de la sucesión de algoritmos que se precise para "resolver un problema" como índice de la incertidumbre engendrada al "plantear" tal problema, y concebimos el aprender como un proceso que conserva dentro de unos límites la *velocidad de reducción* de ν; por ejemplo, $\xi_1 \geq -\Delta\nu/\Delta t \geq \xi_2$; $\xi_1 > \xi_2 > 0$ (y, por tanto, Ξ será un sistema auto-organizador). Considérese la posibilidad de interacción entre este nivel "conceptual" del índice y los índices de estado de un nivel mecánico; y en particular, que se ejerce cierto regimiento para estabilizar $-\Delta\nu/\Delta t$ (valiéndose de un reajuste de estos parámetros "mecánicos").

Hemos distinguido ciertos *mecanismos* subyacentes al aprendizaje, a saber: la "adaptación" y las "evoluciones regional y lingüística"; y todos ellos se presentan en un elemento o "medio" (tal como un cerebro o un artilugio), en el que la cuota de actividad tiene que permanecer, por término medio, constante. La adaptación es un mecanismo en virtud del cual los sucesos repetidos imprimen unas configuraciones estructurales (en el caso de α, unas distribuciones espaciales de las impedancias sinápticas, y en el de β, unas vías, más o menos ramificadas, sensibles a la frecuencia); y dadas las particularidades mecánicas, pueden calcularse un par de índices (σ_α y σ_β, digamos) del grado de adaptación. (Si σ_α es elevado, $\varphi \to \varphi_0$, y Ξ se encarna o corporeiza en la parte especial del elemento —o medio interno— para la que se haya calculado σ_α.)

La evolución regional es un proceso por el cual las correlaciones de la actividad aumentan la extensión del elemento o medio que en el instante que sea encarne Ξ; y, una vez más, dadas las particularidades mecánicas, puede calcularse un índice de correlación (ρ, digamos). Cuanto más elevado sea ρ, tanto más complicados serán los concomitantes mecánicos de cualquier suceso conceptual (o sea, de la aplicación de un algoritmo, η).

Ahora bien, la *adaptación* implica una restricción impuesta a la gama de algoritmos disponibles; su efecto es inespecífico, pero, en general, puesto que la adaptación implica $\varphi \to \varphi_0$ y dado que $\nu(\varphi_i \cup \varphi_0) > \nu(\varphi_0)$, el resultado a que conducirá será a una reducción de ν; y un aumento de la velocidad de adaptación hará aumentar $-\Delta\nu/\Delta t$.

Al nivel conceptual, la disminución de $\mu(\varphi)$ implica una *composición* de algoritmos: el que se elija, tras η_2, $\eta^*\,[\tau(x)] = \eta_1\,[\eta_2\,[\tau(x)]]$, en vez de η_1. (La composición incrementa el número de miembros de E que se hayan usado al menos una vez.) Sea $\gamma(\eta)$ el número de *etapas* —que *corresponden* a acontecimientos mecánicos— involucradas en la aplicación de η; por lo regular, $\gamma(\eta^*) > \gamma(\eta_1) + \gamma(\eta_2)$, de acuerdo con RASHEVSKI (1962). Interpretaremos el *proceso* que proporcione la complicación mecánica que se necesite para lograr la *composición* como una evolución *regional* (adviértase que, además, ésta pasa la corporeización de Ξ a alguna otra zona del ambiente posiblemente dotada de un valor de σ_α más pequeño; y, por tanto, logra una homeóstasis).

Finalmente, identifiquemos la evolución *lingüística* con un aumento de vocabulario.

De acuerdo con RASHEVSKI (1962), ciertos algoritmos (como los que duplican una palabra en una sucesión de ellas) no pueden actuar sobre ninguna palabra de un vocabulario dado, sino que exigen unos signos adicionales, especiales, que toman parte en el proceso (aun cuando permanecen intactos en el resultado final); por consiguiente, los algoritmos de este tipo actúan sobre un vocabulario incrementado, y dom(E) aumenta. (Como es necesario que los signos suplementarios sean *diferentes*, la mera adición de signos de α no sería suficiente.) Existe una correspondencia

muy razonable y tentadora entre la evolución *lingüística,* que involucra una modificación del dominio de Ξ (y/o de su rango o codominio), y el aumento de un vocabulario de $\tau(X^{\alpha})$ a $\tau(X^{\alpha} \cup X^{\beta})$ y de $\tau(Y^{\alpha})$ a $\tau(Y^{\alpha} \cup Y^{\beta})$; pero tal vez sea mejor, en este caso, considerar la aparición de los algoritmos de esta forma como consecuencia del proceso reproductivo que, según hemos razonado, forma el espinazo del aprender.

Observaciones sobre la representación de los sistemas

Vamos a relacionar los conceptos de *3.4* con la representación formal de ROSEN (1958) y, en particular, a ocuparnos del caso especial que hemos estudiado pormenorizadamente en *5.1-5.6* y *6.1-6.5.*

1) Supongamos que una descripción de estado (en el lenguaje científico λ) de un sistema físico, Ξ, proporciona un conjunto de estados identificados, $z \in Z$, y efectuemos la partición de éstos en subconjuntos (clases de equivalencia, Z/ρ, inducidas por la partición ρ), que corresponderán a los subsistemas $\Xi_i \in \Xi$, $i = 1, 2, \ldots n$.

2) Según ROSEN (1958), un sistema está determinado por un grafo orientado en el que los arcos (orientados) correspondan a aplicaciones y los nodos a la conjunción del dominio de una aplicación F, dom(F), con el conjunto producto formado a partir —como factores— de los subconjuntos del rango de otras aplicaciones, ran(F) (suponiendo que todos los dom(F) y ran(F) de Ξ estén definidos).

Así pues, $\Xi_i \in F_i$; $\text{dom}(F_i) \rightarrow \text{ran}(F_i)$. Y si Ξ es la realización o corporeización física de un sistema de comunicación, $\Xi_i \in F_i$; $\text{dom}(F_i) \rightarrow Z_i$.

Vamos a especificar, además, que Z_i sea un factor de dom(F_i); por tanto,

$$\Xi_i \in F_i;\ [(Z_j^* \otimes \ldots\ldots\ldots Z_{j+m}^*) \otimes Z_i] \rightarrow Z_i$$

siendo Z_i^* y Z_m^* subconjuntos de Z_j y Z_m, $j = 1, 2, \ldots n$ (pero no i) y $j + m = j \ldots n$ (pero no i).

3) Definimos, para los subsistemas adaptativos (todos los de interés lo son) un parámetro, φ_i, siendo $\varphi_{\text{máx}} \geq \varphi_i \geq 1$, tal que φ_i sea índice de f_{φ_i} en el conjunto $F_i = \cup_{\varphi^i} (f_{\varphi^i})$ cuando $\Xi_i = f_{\varphi^i}$; $[(Z_j^* \otimes \ldots Z_{j+m}^*) \otimes Z_i] \rightarrow Z_i$; y Ξ_i es adaptativo si, dada una secuencia estacionaria, $[x] \subset X_i$ (condición redundante, ya que todos los dom(F) y ran(F) de Ξ están definidos y se encuentran ligados con otros subsistemas especificados de análoga manera), una secuencia convergente de valores de φ_i, $[\varphi_i]$, induce una secuencia convergente $[z] \subset Z_i$ de tal suerte que, tras un intervalo de adaptación, $[z]$ se encuentre en un subconjunto, $Z_i^* \subset Z_i$.

4) La adaptación está orientada: la sucesión convergente de valores de φ_i se selecciona de tal modo que maximice cierta variable a la que, de

momento, identificaremos con la renta de que disponga θ_i (más adelante daremos una interpretación muy diferente de esta variable).

Expresado formalmente, sea G_i una función cuyo dominio sea el conjunto producto $Z_i \otimes [z_j \otimes \ldots z_{j+m}]$, en donde $n \geq m + 1$ asignará un valor numérico a cada estado de $Z_i \otimes [z_j \otimes \ldots z_{j+m}]$ (cada elemento de este conjunto designa el estado de Ξ_i —definido de modo inmediato como cierto elemento de Z_i— en relación con los estados de $m + 1$ subsistemas distintos); y hagamos que θ_i denote el valor medio de G_i a lo largo de una secuencia arbitraria de cambios de estado.

Definimos la adaptación como todo proceso que seleccione los valores de φ_i que maximicen θ_i (como no nos ocupamos tanto del mecanismo como del modelo de mecanismo, es innecesario hablar de cómo se conseguirá tal selección). Consideramos que es característico del elemento o medio físico en que se encuentre realizado el sistema, I) que se produzca dicha selección de φ_i (o de cualquier cosa que corresponda a nuestra representación de un parámetro adaptativo), y II) que las selecciones que maximicen θ_i conduzcan a secuencias convergentes, $[\varphi_i]$, de los valores de φ_i (y, por ello, a un cambio adaptativo).

Indicamos, finalmente, que el proceso selectivo entraña la idea de "azar", si bien solamente en el débil sentido de un proceso "independiente", que decide entre diversos valores posibles de φ_i sin tener datos suficientes. Por consiguiente, el "azar" queda subsumido en las características del ambiente físico.

5) Ahora bien, en Ξ se encarnan o realizan unos sistemas de comunicación, que vamos a separar ahora mismo de Ξ; es decir, vamos a fijarnos en ciertas estructuras informativas que se necesitan para conservar la estabilidad física de Ξ, con independencia de la organización subyacente, restringida físicamente. Mas una separación realista descansa en el hecho de que la comunicación es ventajosa para la maximización de θ_i (que constituye la base de nuestros criterios de estabilidad) y de que sin ella no se puede producir ésta en forma física y sistemática [*consistent*], como no sea de un modo accidental. Afirmamos, pues, que G_i está definida de tal modo que ciertos elementos del conjunto $Z_i \otimes (z_j \otimes \ldots z_{j+m})$ —que únicamente puede conseguirse de una forma sistemática (esto es, no accidental) mediante una acción coordinada por parte de varios subsistemas, Ξ_j, Ξ_m, en conjunción con Ξ_i— tengan para Ξ_i unos valores de θ más elevados que los que podrían lograrse de un modo independiente. (G_i induce una cooperación que implica una interacción y puede entrañar una comunicación.)

6) Para extraer un sistema de comunicación de su realización corporal en Ξ ejecutamos una *abstracción,* por la cual identificamos ciertos subconjuntos de estados con *signos.* Y ahora atendemos a los sistemas físicos, Ξ, que proporcionen, por abstracción, al menos un par de sistemas de comunicación distintos, *A* y *B,* caracterizados respectivamente por los lenguajes operativos α y β. (En el modelo de *5.1-5.6* y *6.1-6.5,* las abstrac-

ciones definen la configuración espacial y los atributos frecuenciales de los acontecimientos físicos.)

Formalicemos la abstracción mediante una aplicación unívoca J^{α} o J^{β}, siendo $J^{\alpha}(Z_i) = Y_i^{\alpha}$ y $J^{\beta}(Z_i) = Y_i^{\beta}$. Por tanto, un sistema de comunicación, $\Xi_i^{\alpha} \in A$, es el siguiente: $\underset{\varphi_i}{\Xi^{\alpha}} = \underset{\varphi_i}{f^{\alpha}}$; $X_i^{\alpha} \otimes Y_i^{\alpha} \rightarrow Y_i^{\alpha}$; $\underset{\varphi_i}{f^{\alpha}} \in F^{\alpha}{}_i = J^{\alpha}(F_i)$, siendo $X_i^{\alpha} = Y_j^{\alpha} \otimes \ldots Y_m^{\alpha}$ (en el caso de $\Xi_k^{\beta} \in B$ se emplean definiciones análogas). Finalmente, y como convención, incluimos un valor indiferente (o ineficaz) * en cada Y_i^{α} o cada Y_k^{β}.

La imagen *probabilística* de un sistema de comunicación, con la que estamos más familiarizados, es:

$$\Xi_i^{a} = P_i^{a} X_i^{a} \otimes Y_i^{a} \rightarrow Y_i^{a}$$

siendo P_i^{α} una matriz de las probabilidades conjuntas —estimadas empíricamente— de las enunciaciones x, y (por ejemplo, $p(x, y)$, probabilidades estimadas a partir de las cuales cabe inferir las probabilidades $p(\underset{\varphi_i}{f})$ = $= [p(\varphi_i = 1), p(\varphi_i = 2), \ldots, p(\varphi_i = \varphi_{\text{máx}})]$.

7) Por la definición anteriormente dada, la comunicación es posible en A si y sólo si el grafo orientado de A —o sea, el de $J^{\alpha}(\Xi)$— posee subgrafos cíclicos; y lo será en B si y sólo si el grafo orientado de B —esto es, el de $J^{\beta}(\Xi)$— posee tales subgrafos. Otra condición posible es la de que Ξ_i^{α} se comunicará si y sólo si

$$Y_i^{a}; X_i^{*a} \subset Y_j^{a}; X_j^{*a} \subset \ldots\ldots\ldots Y_r^{a}, \text{ siendo o i) } r = i, \text{ o ii) } X_r^{*a} \subset Y_i^{a}$$

8) El vocabulario de α es: $X^{\alpha} \cup Y^{\alpha}$; $X^{\alpha} = \cup_i(X_i^{\alpha})$, $Y^{\alpha} = \cup_i(Y_i^{\alpha})$; y el de β es: $X^{\beta} \cup Y^{\beta}$; $X^{\beta} = \cup_k(X_k^{\beta})$, $Y^{\beta} = \cup_k(Y_k^{\beta})$. Las enunciaciones *posibles* en α son pares productos, x, y, $\in X^{\alpha} \otimes Y^{\alpha}$, y las posibles en β son pares productos, x, y, $\in X^{\beta} \otimes Y^{\beta}$; pero las que son *factibles* dependen de las funciones que definan los sistemas de comunicación, o sea, de $\underset{\varphi_i}{f^{\alpha}}$ y $\underset{\varphi_i}{f^{\beta}}$. Cualquier enunciación determina una relación unívoca entre los subsistemas Ξ_j^{α}, Ξ_m^{α} y cierto subsistema especial, $\Xi_i^{\alpha} \in A$, cuyo carácter depende de la forma del grafo del sistema y de la distribución de valores de las φ_i (pues el dominio de un subsistema es un conjunto producto, y su rango, un factor de un conjunto producto); y un razonamiento análogo es aplicable al caso de $\Xi_k^{\beta} \in B$.

La mayoría de las enunciaciones tienen una connotación local.

9) Las enunciaciones *legítimas*, x, y, $= e \in E^{\alpha}$, y x, y, $= e \in E^{\beta}$ (siendo E^{α} y E^{β} conjuntos de enunciaciones legítimas de α y β, respectivamen-

---

* Esto es, un módulo respecto de la ley de composición representada, al nivel de los conjuntos, por «⊗». (N. DEL T.)

te) "significan lo mismo para" todos los subsistemas $\Xi_i^\alpha \in A$ (o todos los $\Xi_k^\beta \in B$, respectivamente).

Para definir qué es "significar lo mismo" tenemos que referirnos a la corporeización física del sistema de comunicación, pues tal vez la mínima definición no trivial de que x "significa lo mismo para" Ξ_i^α que para Ξ_j^α sea la de que, en las mismas condiciones, la recepción de x inducirá "el mismo *estado*" en Ξ_i^α que en Ξ_j^α.

10) Sea z_0 un estado de Z, y sea ε una relación de equivalencia en Z; así, si $z_0 \varepsilon z$, ocurrirá que z_0 y z serán estados equivalentes; y denotaremos con z_0/ε la clase de equivalencia de z_0 con respecto a ε. (La representación formal no *determina* la elección de una relación concreta, ε, excepto en el trivial sentido de que la relación que se elija tiene que no estar en contradicción con todo el marco conceptual: en particular, si los $z_0 \varepsilon z$ se consideran como "el mismo estado", es preciso que existan signos que "signifiquen lo mismo".)

11) Fijémonos en el par $x_0 \in X^\alpha$, $x_1 \in X^\alpha$, siendo $x_0 \in \mathrm{dom}(f^\alpha_{\varphi_i}) \subset X_i^\alpha$ y, análogamente, $x_1 \in \mathrm{dom}(f^\alpha_{\varphi_i}) \subset X_i^\alpha$. Hagamos que $x_0 \pi x$ implique que x_0 "significa lo mismo que" x si y sólo si para todo $\Xi_i^\alpha \in A$ y todo $\Xi_j^\alpha \in A$, y para el mismo $z_0 \in Z$, se cumple que:

i) cuando $(y \in Y_i^\alpha) = (y \in Y_j^\alpha) = \hat{y}$, y

ii) cuando $\varphi_i = \varphi_j = \varphi_0$, siendo φ_0 un valor de φ,
sea $f^\alpha_{\varphi i}(x_0, \hat{y},) \in z_0/E \cap Z_i$
y asimismo sea $f^\alpha_{\varphi j}(x_1, \hat{y},) \in z_0/E \cap Z_i$.

12) Imponemos ahora la plausible restricción de que J^α aplique $z_0/\varepsilon \cap Z_i$ sobre un solo miembro, y_a, de Y_i^α (que puede ser el elemento indiferente), y, análogamente, que J^β aplique $z_0/\varepsilon \cap Z_k$ sobre un solo miembro, y_b, de Y_k^β.

13) En tal caso, x_0/π será un *signo* dotado del *significado* común al conjunto z_0/ε; cualquier $x_a \in x_0/\pi$, $x_b \in x_0/\pi$, podrá combinarse con y_a (si es que, además, $x_a \in X^\alpha$) para dar un enunciado legítimo, x_a, $y_a = e_a \in E^\alpha$, y (si $x_b \in X^\beta$) para dar un enunciado legítimo, x_b, $y_b = e_b \in E^\beta$. Al decir "combinarse" aludimos a que —dados un $\hat{y}$ seleccionado por Ξ_i^α y un valor apropiado de φ_i— "se haga llegar" x_a a Ξ_i^α (y, en el caso de x_b, lo mismo con referencia a Ξ_k^β y a φ_k, en lugar de a Ξ_i^α y a φ_i).

14) Los conjuntos de signos son *informativos* si existen clases de equivalencia como z_0/E, z_1/E, ..., y valores de φ_i como φ_0, φ_1, ..., tales que si $\varphi_i = \varphi_0$, se tenga $f^\alpha_{\varphi_i}(x_0, \hat{y},) \varepsilon z_0/E \cap Z_i$ (lo cual implicará que $y_0 \in Y^\alpha$), y que si $\varphi_i = \varphi_1$, se tenga, en vez de lo anterior, $f^\alpha_{\varphi_i}(x_0, \hat{y},) \varepsilon z_1/E \cap Z_i$ (lo que implicará $y_1 \in Y_i^\alpha$); pues, en este caso, la selección de $y \in Y_i^\alpha$ indicará la adaptación de Ξ_i^α.

15) Nos encontramos ahora en situación de especificar la composi-

ción de los conjuntos de enunciaciones legítimas de los lenguajes operativos α y β, a saber: unos conjuntos, E^α y E^β, de pares productos que se definirán de modo que sean disjuntos ($E^\alpha \cap E^\beta = 0$).

Sea X/π el conjunto de las clases de equivalencia x_r/π, y Z/ε el conjunto de las clases de equivalencia z_r/ε:

$$U^a = \underset{\substack{x_r/\pi \\ \text{de} \\ X/\pi}}{\cup} \{ \underset{\substack{z_r/E \\ \text{de} \\ Z/E}}{\cup} \{x_r/\pi \cap [\underset{\Xi_i^a \in A}{\cup} (\text{dom}\,(F_i^a))]\} \otimes y_r\}$$

y análogamente para $E\beta$, sin más que reemplazar $\Xi_i^\alpha \in A$ por $\Xi_k^\beta \in B$ y $\text{dom}(F_i^\alpha)$ por $\text{dom}(F_k^\beta)$.

16) El discurso *coherente* —e, incidentalmente, asimismo *informativo*— en α o en β consta de secuencias de enunciaciones legítimas. Ahora bien, no es éste el único discurso en α o en β, respectivamente: pues para algunos valores de φ_i, dado x_0, Ξ_i^α dará lugar a un y tal que x_0, y no se encuentre en E^α (y parecidamente ocurrirá con φ_k, Ξ_k^β y ciertos signos que no pertenecerán a $E\beta$); pero mientras α y β sean lenguajes operativos tiene que existir un universo del discurso coherente, y la comunicación que se produzca en él se caracterizará por sucesiones o secuencias $[e_\alpha] \subset E^\alpha$ y $[e_\beta] \subset E\beta$.

17) Los factores de las x de una secuencia coherente de discurso, $[e_\alpha] = x_1 \to \hat{y}_1 \to x_2 \to \hat{y}_2 \to$ tienen que ser $y_r \varepsilon J^\alpha(Z_r/E)$. En efecto, puesto que la comunicación es coherente, cualquier selección de $\hat{y}$ tomada de Y_i^α (o, en el caso de Ξ_k^β, tomada de Y_k^β) tiene que corresponder a alguna $y_r \varepsilon J^\alpha(Z_r/E)$ (o bien, en el caso de uno de los subsistemas de B, a $y_r \varepsilon J^\beta(Z_r/E)$); ahora bien, X_i^α y X_k^β son conjuntos producto formados, respectivamente, con los factores Y_j^α e Y_l^β, y, por otra parte, los únicos valores de estos factores que se realizan en el discurso coherente son signos $\hat{y} = y_r$ o componentes de ellos, según hemos visto arriba.

18) De ahí que $\hat{y} = J^\alpha(Z_r/E \cap Z_i)$, $\hat{y} \in Y_i^\alpha$ para algunos r, y que $\hat{y} = J^\beta(Z_r/E \cap Z_k)$, $\hat{y} \in Y_k^\beta$ para otros r. Además, en el grafo orientado, los subsistemas Ξ_j^α y Ξ_m^α proporcionan una entrada al subsistema Ξ_i^α, y para $x \subset X_i^\alpha$, $-x = J^\alpha(z_a \ldots\ldots z_b)$, siendo z_a el estado $z_a \in Z_a/E \cap Z_j$, y z_b el estado $z_b \in Z_b/E \cap Z_m$. Así pues, empleando para β una argumentación análoga llegamos a la estructura que puede verse más abajo, en la figura 9.

Los subsistemas físicos Ξ_i, cuyo comportamiento engendra el discurso, son adaptativos en el sentido de 3) y de 4), pues los valores de φ_i convergen hacia un valor definido, φ_0. La evolución regional entraña el acople "cooperativo" y estable de estos subsistemas (en el sentido de que la medida de $\text{dom}\, f_{\varphi_i} \cap \text{dom}\, f_{\varphi_j}$ aumenta por efecto de la adaptación), y se la denota mediante "$\Xi_i,\ \Xi_j \to \Xi_i \cup \Xi_j$".

Adviértase que las enunciaciones de Ξ_i^α ya no son distintas, en λ, de

las de Ξ_j^α, y que se convierten en "enunciaciones conjuntas" (ya que para lograr separarlas sería necesario averiguar qué parámetro correspondía a cada enunciación, si el aludido con el marbete "*i*" o el de "*j*", y adscribírselo).

La condición 15) y la 17) implican que, con objeto de conservar entre Ξ_i y Ξ_i^α la relación $\Xi_i^\alpha = J^\alpha(\Xi_i)$, así como $E^\alpha \cap E^\beta = 0$, es necesario elegir $\mathscr{L}$ y E de modo que no haya ningún subgrafo cíclico del sistema que incluya un Ξ_i tal que $J^\alpha(\Xi_i) = \Xi_i^\alpha \in A$ y que incluya también un Ξ_k tal que $J^\beta(\Xi_k) = \Xi_k^\beta \in B$. Por lo tanto, el acople $\Xi_i \cup \Xi_k$ está prohibido.

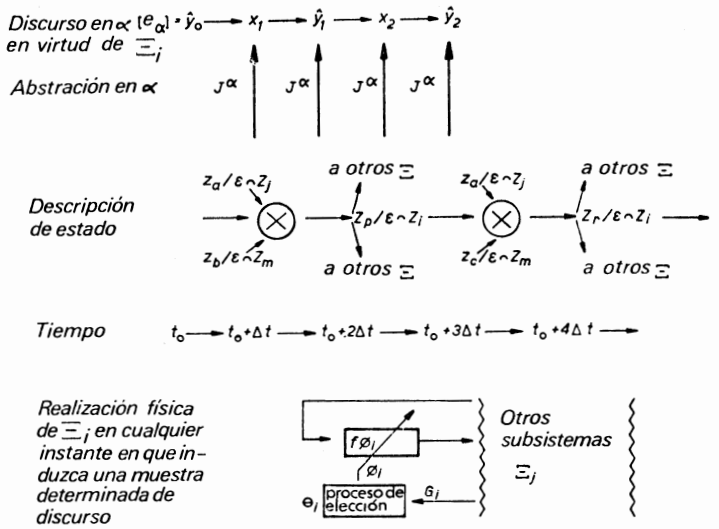


Fig. 9

19) Hay varias maneras de efectuar la discusión de este sistema. La más amplia se refiere a la realización física: en ella se conservan las relaciones ρ y ε, y las abstracciones J^α y J^β tienen una forma definida (en el caso considerado, los atributos "frecuenciales" y los de configuración física de los sucesos físicos). Luego vienen los sistemas de comunicación extraídos mediante J^α y J^β, que están relacionados a través de las clases de equivalencia inducidas por ε. Finalmente, puede estudiarse el discurso caracterizado por una relación, π, inducida por ε; y cuando se habla en estos términos puede ser imposible mantener la identificación entre los sistemas de comunicación Ξ_i^α, Ξ_k^β y los subsistemas físicos inicialmente elegidos, Ξ_i, Ξ_k.

20) Para conservar la integridad de α y de β necesitamos una condición del tipo de $E^\alpha \cap E^\beta = 0$. Por otra parte, la posibilidad de traducción depende de la interacción $\alpha\beta$ y de la $\beta\alpha$, que están representadas formal-

mente por una aplicación Ω_i (con un parámetro i tal que si $X_0^* \subset X\beta$, sea *posible* que $\Omega_i(X_0^*) \subset \text{dom}(F_i^\alpha)$; y viceversa para el paso de α a β); pero, con objeto de conservar la distinción $\alpha\beta$, si $\Omega_i(X_0^*) \subset \text{dom}(F_i^\alpha)$, *no* es verdad que $\Omega_i(X_0^*)\pi x$ para ningún $x \in X^\alpha$; luego los dos sistemas que hemos considerado no pueden traducir un discurso coherente.

21) De hecho, la traducción entraña la *construcción* de un tipo lógico diferente de enunciados; y debido a ello existe, desde el punto de vista del observador, una incertidumbre en lo que respecta al *tipo* —es preciso tener cuidado en la interpretación de esta observación—, pues en la discusión de la estructura que hemos llevado a cabo en 19) entran tipos de enunciados abiertamente distintos. Ahora bien, la traducción entraña que se constituyan unos *órdenes* superiores de funciones; y de aquí procede que las proposiciones de un observador acerca de la traducción sean de un tipo distinto y más elevado (en particular, su interpretación lingüística del sistema le lleva a desechar la definición de los subsistemas como entidades localizadas mediante ρ).

22) Una representación formal de lo que ocurre cuando un subsistema —al menos, de la índole que hemos considerado— traduce una secuencia coherente del discurso nos lleva a reinterpretar la idea que teníamos de subsistema —o, cosa equivalente, de la función que él compute—; el meollo de la cosa está en que la distinción básica entre los subsistemas Ξ_i descansa en que se tenga en cuenta la totalidad de la estructura de la figura 9; y $\mathscr{L}$ se elige de forma que se satisfaga tal distinción. Hasta el momento nos hemos ocupado de unas enunciaciones, E^α y $E\beta$, caracterizadas por funciones de orden I, F_i^α, F_j^α, y F_k^β, F_l^β; pero ahora hemos de atender a la construcción de funciones de orden II (o superior) que determinen "enunciaciones" de las formas $E^\alpha \otimes E^\alpha$, $E\beta \otimes E\beta$ o (puesto que no está prohibido) $E^\alpha \otimes E\beta$.

Denotemos: i) con x_a [elementos] de $e_a \in E^a$, y con x_b [elementos] de $e_b \in E^\beta$,

ii) con $\xi_a = (x_a, x_a)$ [elementos] de $(e_a, e_a) \in E^\alpha \otimes E^\alpha$,

con $\xi_b = (x_b, x_b)$ [elementos] de $(e_b, e_b) \in E^\beta \otimes E^\beta$, y

con $\xi_c = (x_a, x_b)$ [elementos] de $(e_a, e_b) \in E^\alpha \otimes E^\beta$

Si puede interpretarse π como de orden II (la suposición de que pueda es la condición de "semejanza" de *3.4*), no está prohibida ninguna de las relaciones que siguen:

1) $x_a \pi \xi_a$, $x_b \pi \xi_b$ (que no son traducciones),

2) $\xi_a \pi \xi_c$, $\xi_b \pi \xi_c$, y, por tanto, cuando se da $x_a \pi x_b$ y se tiene en cuenta *1)*, $\xi_a \pi \xi_b$, lo cual implica la posibilidad de traducción. Ahora bien, decir "$x_a \pi x_b$" contradice las restricciones que habíamos impuesto desde el principio al sistema si es que interpretamos esta proposición como de tipo I (o sea, como referente a funciones de orden I), en tanto que no las contradice si la interpretamos como de tipo II (dicho de otro modo, si concebimos

ahora "significar lo mismo que" como una relación que ligue funciones de orden II y los sistemas que éstas caractericen, cualesquiera que sean). O bien podemos definir una nueva relación, π^*, tal que "$x_a \pi^* x_b$" sea una proposición de tipo I que sea verdadera si y sólo si es verdadera la proposición de tipo II "$x_a \pi x_b$".

23) Según 18), la evolución regional implica Ξ_i, $\Xi_j \rightarrow \Xi_i \cup \Xi_j$. Puede decirse que el comportamiento de $\Xi_i \cup \Xi_j$ —y el discurso engendrado por el sistema de comunicación correspondiente y acoplado— está determinado por una función de orden más elevado que las funciones, de orden I, f_{φ_i} y f_{φ_j} que son miembros de su dominio (o también, cosa equivalente, que el acoplamiento introduce en el sistema nuevos axiomas, puesto que el grafo queda definido de nuevo). La evolución lingüística, que entraña la "traducción" o "identificación" de signos, tendría que involucrar acoples tales como $\Xi_i \cup \Xi_k$, pero están prohibidos por 18); sin embargo, no está prohibido el acople "$[(\Xi_i \cup \Xi_j) \cup (\Xi_k \cup \Xi_l)]$", que se interpreta como una vinculación o asociación estable y cooperativa entre los sistemas acoplados $\Xi_i \cup \Xi_j$ y $\Xi_k \cup \Xi_l$. No obstante lo cual, adviértase que, lo mismo que en 18), las enunciaciones de Ξ_i^α son inseparables de las de Ξ_j^α, y las de Ξ_k^β de las de Ξ_l^β; y, por ello, si en el marco descriptivo original, en λ, se describe una aplicación de enunciaciones, Ω, tiene que llevar como parámetros los marbetes "i" y "j".

24) Atendamos, en particular, al caso especial de que una secuencia coherente del discurso de α, μ^α, describa un subsistema (puesto que los subsistemas se identifican con funciones, basta que μ^α presente el comportamiento completo de uno de ellos). Entonces, la traducción $\mu^\alpha \rightarrow \mu^\beta$ será una reproducción del subsistema que sea (adviértase, 1), que éste es el caso que hemos estudiado principalmente en *5.1-5.6* y *6.1-6.5*, y 2), la estrecha relación en que se encuentra con la paradoja roseniana, ROSEN, 1959); mas para que lo reproduzca un subsistema de α es necesario invocar otro subsistema distinto (aquí, la imagen en β del subsistema de α), y para poder hablar acerca de este proceso es menester invocar la idea de tipo lógico. En ROSEN (1959), el tipo lógico de los enunciados sobre el sistema y su medio (*distinto* de él) es superior al tipo original, o sea, al de los enunciados sobre el (imposible) sistema auto-*reproductivo*; en el caso actual, lo que corresponda físicamente al sistema de α se reproducirá en el "medio" aportado por lo que corresponda físicamente al sistema de β, y viceversa; lo cual (expresado en la terminología del discurso de α y el de β) entraña una "traducción".

25) Cabe que sean posibles varias realizaciones físicas; nosotros hemos considerado únicamente un sistema evolutivo particular, cuyos subsistemas se caracterizan por una combinación de las Ξ_i que se representa formalmente por "$\Xi_i \cup \Xi_j$".

26) Ahora bien, cualquier grupo de Ξ_i que se comunique constituye

trivialmente una combinación de esta naturaleza. Sin embargo, adoptamos la razonable convención de escribir "$\Xi_i \cup \Xi_j$" si y sólo si la correlación existente entre los estados de Ξ_i y algunos otros estados de Ξ_j vale 1; o sea, si es tal que no cabe interpretar razonablemente como comunicación la interacción que haya entre los subsistemas mencionados, ya que como resultado de ella no se resolvería ninguna *duda.*

27) Con objeto de conseguir $\Xi_i \cup \Xi_j$ se modifican las reglas de la adaptación según se indica en *3.4* (y como luego se ejemplifica en *5.1-6.5* y *6.1-6.5*).

I) La adaptación es localmente irreversible: esto es, con respecto a ρ y a la distinción entre Z_i y Z_j.

II) $\theta_i = \theta(\Xi_i)$ constituye un índice de supervivencia: afirmamos que el elemento o medio físico en que se encarne Ξ_i tiene que conservarse a un coste que se mide por $\theta(\Xi_i)$, y por ello el criterio de maximizar este parámetro es un criterio de supervivencia (por ejemplo, para lograr ésta ha de ser $\theta(\Xi_i) \geq \theta_0$).

III) Los G_i se definen de modo que θ sea superaditivo, o sea, que $\theta(\Xi_i \cup \Xi_j) > \theta(\Xi_i) + (\Xi_j)$.

IV) Con objeto de que represente la *supervivencia,* el grafo orientado de Ξ_i está definido si y sólo si su realización física sobrevive, esto es, si y sólo si $\theta(\Xi_i) \geq \theta_0$.

28) Necesitamos, finalmente, una regla de sustitución para evitar el agotamiento y, en último término, la desaparición de los subsistemas. En cierto sentido apropiado, el dominio y el rango de los conjuntos de funciones potencialmente definibles se crean de modo que se conserve una población media de n subsistemas que se diferencien y (asimismo, por ser θ superaditivo) se agreguen en virtud de una *adaptación.*

RESUMEN

Hemos estudiado un modelo cibernético en el que el aprendizaje y el conocer resultan ser componentes de un proceso evolutivo que transcurre en un sistema auto-organizador. Este modelo esclarece el papel de las funciones "distribuidas" o "no localizadas", y posee una interesante asimetría, que parece dar cuenta de algunas de las peculiares discontinuidades del comportamiento que están ligadas a la "atención" y al "caer en la cuenta" o "percatarse".

Con objeto de someter a examen la actividad de un sistema auto-organizador es necesario adoptar un marco descriptivo aplicable al caso en que (actuando como observadores o experimentadores) suframos una incertidumbre estructural, según nos sucede —si bien suele olvidarse— en todo debate de orden intelectual. Por aclarar este punto: no podemos definir, como hace el ingeniero, la repre-

sentación de un mensaje con entera certidumbre; pero ello no significa que no quepa construir el modelo correspondiente (y, en realidad, existe una realización física del mismo en funcionamiento). Hasta hace pocos meses, el correlato cerebral más probable del proceso evolutivo de este modelo cibernético parecía ser un modo de actividad cambiante de unos circuitos neuronales resonantes; pero, si bien esta interpretación sigue siendo plausible, nos conduce a buscar otros mecanismos físicos con los que pudieran entrar en interacción aquellos circuitos; y algunos trabajos recientes efectuados en el extranjero señalan la existencia de cierto número de mecanismos fisiológicos que actúan al nivel macromolecular (en el que podrían realizarse o corporeizarse las interacciones necesarias).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANGYAN, A. J., (1958): An analogue model to demonstrate some aspects of neural adaptation. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Her Majesty's Stationery Office (p. 933).

ASHBY, W. ROSS (1956): Design for an intelligence amplifier. *Automata Studies,* ed. de C. E. SHANNON y J. MCCARTHY. Princeton de N. J. Princeton University Press.

ASHBY, W. ROSS, (1958): The mechanism of habituation. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Her Majesty's Stationery Office.

BARBIZET, J., y ALBARDE, P., (1961): Mémoires humaines et mémoires artificielles. *Concours Méd., 6.*

BEER, S. (1961): *Cybernetics and Management.* Londres, English Universities Press.

BEER, S. (1962): Towards a cybernetic factory. *Principles of Self Organizing Systems,* ed. de H. M. VON FOERSTER y G. W. ZOPF. Proceedings Urbana Symposium. Pergamon Press.

BEURLE, R. L., (1954): Activity in a block of cells capable of regenerating impulses. *R. R. E. Memoranda, 1042.*

BOK, S. T., (1961): Recognising learning and interpretation in the vacuole memory theory. *Proceedings 3rd International Congress of Cybernetics. Namur.* París, Gauthier-Villars.

BONNER, J. T., (1958): *The Evolution of Development.* Cambridge, University Press.

BRAITHWAITE, R. B., (1962): *Is there a Natural Ordering amongst Theoretical Concepts?* Alocución presidencial a la British Society for the Philosophy of Science, aún no publicada.

BROADBENT, D. E., (1958): *Perception and Communication.* Londres, Pergamon Press.

BROWN, J., (1958): Information, redundancy and decay of the memory trace. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Her Majesty's Stationery Office.

BUSH, R. R., y MOSTELLER, F., (1955): *Stochastic Models for Learning.* Nueva York, Wiley.

CAIANIELLO, S., (1961): Outline of a theory of thought processes and thinking machines. *Journal of Theoretical Biology, 2,* 204-235.

CAMERON, S. H., (1960): An estimate of the complexity requisite in a universal decision network. *W.A.D.D. Bionics Symposium.* Wáshington, A.S.T.I.A.

CARNAP, R., (1947): *Meaning and Necessity. A Study in Semantics and Model Logic.* Chicago.

ESTES, W. K., (1950): Towards a statistical theory of learning. *Psychological Review, 57,* 94-107.

EYSENNK, H. J., (1956): Reminiscence, drive and personality theory. *Journal of Abnormal and Social Psychology, 53,* 328-333.

GEORGE, F., (1961): *The Brain as a Computer.* Londres, Pergamon Press.

GREENE, P. H., (1961): In search of the fundamental units of perception. *Technical Report AF 49 (638)-414.* Chicago, United States Air Force.

GUNTHER, G., (1962): Cybernetic ontology. *Proceedings ONR, Armour Research Conference on Self Organising Systems,* ed. de JOVITTS, JACOBI y GODSTEIN. Chicago, Spartan Books.

HARMON, L. D., (1959): The artificial neurone. *Science, 129,* 962.

HARMON, L. D., (1961): Studies with artificial neurones. I. Properties and functions of an artificial neurone. *Kybernetik,* 1, 89-101.

HEBB, D. O., (1949): *The Organisation of Behaviour.* Nueva York, Wiley.

HULL, C. L., (1952): *A Behaviour System.* New Haven, Conn., Yale University Press.

HYDEN, H., (1960): Trabajo aparecido en *The Cell, Vol. 4,* ed. de J. BRACHET y A. E. MIRSKY, Nueva York, Academic Press.

IVAHNENKO, A., (1961, 1962): *Abtomathka,* y comunicación personal.

LETTVIN, J. Y.; MATTURANA, H. R., y MCCULLOCH, W. S., (1959): What the frog's eye tells the frog's brain. *Proceedings Institute of Radio Engineers, 47,* 1940-1951.

MACKAY, D. M., (1951): Mindlike behaviour in artifacts. *British Journal for the Philosophy of Science, 2,* 105-121.

MACKAY, D. M., (1956): The epistemological problem for automata. *Automata Studies,* ed. de C. E. SHANNON y J. MCCARTHY. Princeton de N. J., Princeton University Press (pp. 235-251).

MACKAY, D. M., (1958): Operational aspects of intelligence. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Her Majesty's Stationery Office.

MASTERMAN, M., (1958): *In various reports,* Cambridge Language Research Unit, Cambridge.

MCCULLOCH, W. S., (1960): The reliability of biological systems. *Self Organising Systems,* ed. de M. C. YOVITS y S. CAMERON. Londres, Pergamon Press.

MCCULLOCH, W. S., y MACKAY, D. M., (1952): Limiting information capacity of a neuronal link. *Bulletin Mathematical Biophysics, 14.*

MCCULLOCH, W. S., y PITTS, W. R., (1947): How we know Universals. The perception of auditory and visual forms, *Bulletin Mathematical Biophysics, 9.*

MINSKY, M. L., y SELFRIDGE, O. G., (1960): Learning in random nets. *Information Theory,* ed. de C. CHERRY. Londres, Butterworth (pp. 335-347).

NAGEL, E., (1949): The meaning of reduction in the natural sciences. *Science and Civilisation,* ed. de R. C. STAUFFER. University of Wisconsin Press.

NAPALKOV, A., (1961): Systematics in the working of the brain and some problems in cybernetics. *Proceedings 3rd International Congress of Cybernetics, Namur.* París, Gauthier-Villars.

NAPALKOV, A.; BRAINES, S. N., y SVECHINSKI, V. B., (1959): *Problems in Neurocybernetics.* Moscú, Academia de Ciencias.

PAPERT, D., (1960): Redundancy and linear logical nets. *W.A.D.D. Bionics Symposium.* Washington, A.S.T.I.A.

PASK, G., (1958a): Physical analogues to the growth of a concept. *Mechanisation of Thought Processes.* Londres, Her Majesty's Stationery Office.

PASK, G., (1958b): The growth process inside the cybernetic machine. *Proceedings 2nd International Congress of Cybernetics, Namur.* París, Gauthier-Villars.

PASK, G., (1959): A proposed evolutionary model. *Proceedings Urbana Symposium on Principles of Self Organising Systems.* Londres, Pergamon Press.

PASK, G., (1961a): The cybernetics of evolutionary processes and self organising systems. *Proceedings 3rd International Congress of Cybernetics, Namur.* París, Gauthier-Villars.

PASK, G., (1961b): *An Approach to Cybernetics.* Londres, Hutchinsons.

PASK, G., (1962): Comments on an indeterminacy that characterises a self organising system. *Cybernetics and Neural Processes,* ed. de V. BRAITENBERG y E. CAIANIELLO. Nueva York, Academic Press.

PASK, G., y LEWIS, B. N., (1962): *Annual Report on Burroughs Research Corporation Perception Project.* System Research Ltd, trabajo aún no publicado.

PÁVLOV, I. P., (1927): *Conditional Reflexes.* Londres, Oxford University Press.

POLONSKY, I., (1961): La cellule vue comme un système cybernétique naturel à la lumière des récents progrès à l'électronique moléculaire. *Proceedings 3rd International Congress of Cybernetics, Namur.* París, Gauthier-Villars.

PRINGLE, J. W. S., (1951): On the parallel between learning and evolution. *Behaviour, 3,* 174.

RASHEVSKY, N., (1960): *Mathematical Biophysics.* Nueva York, Dover.

RASHEVSKY, N., (1962): Mathematical foundations of general biology. *Annals New York Academy of Sciences, 96,* 4.

ROSEN, R., (1958): Representation of biological systems from the standpoint of the theory of categories. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 20.*

ROSEN, R., (1959): A logical paradox implicit in the notion of a self reproducing automaton. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 21.*

ROSENBLATT, F., (1961): Perceptrons and the theory of brain mechanisms. *Cornell Aeronautical Laboratory Report* No. *VG-1196-G-8.*

SHERRINGTON, C. S., (1948): *The Integrative Action of the Nervous System.* New Haven, Conn., Yale University Press.

SIEGAL, S., (1959): Theoretical models of choice and strategy behaviour; stable state behaviour in the two-choice uncertain outcome situation. *Psychometrika, 24,* 303-316.

SKINNER, B. F., (1938): *The Behaviour of Organisms; An Experimental Analysis.* Nueva York, Appleton Centory.

UTTLEY, A. M., (1956): Conditional probability machines. *Automata Studies,* ed. de C. E. SHANNON y J. M. MCCARTHY. Princeton de N. J., Princeton University Press.

VON FOERSTER, H. M., (1960): On self organising systems and their environment. *Self Organising Systems,* ed. de M. C. YOVITS y S. CAMERON. Londres, Pergamon Press.

VON FOERSTER, H. M., comunicación personal.

VON FOERSTER, H. M., y PASK, G., (1960-61): A predictive model for a self organising system. *Cybernetica.*

WALTER, W. GREY, (1953): *The Living Brain.* Londres, Duckworth [versión castellana, *El cerebro viviente,* México, F.C.E., 1961].

WIENER, N., (1961): *Cybernetics.* Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology Press. Nueva York, John Wiley.

WIENER, N., (1962): Intervenciones en el *2nd International Congress of Cybernetic Medicine, Amsterdam, 1962,* y en el *International Spring School of Physics (Cybernetics and Neural Processes), Nápoles, 1962.*

WILLIS, G. D., (1959): Plastic neurones as memory elements. *Lockheed Report, LMSD, 48432.*

El obstáculo de la falta de linealidad en neurología

Por P. NAYRAC

Ocurre con frecuencia que, cuando se habla a un interlocutor del enfoque cibernético de las funciones nerviosas, le objetan a uno *a priori* que el sistema nervioso no puede reducirse a una máquina (es la objeción del interlocutor biólogo) o que sus respuestas no son lineales (objeción del matemático).

En realidad, estas dos objeciones no son más que una, pues la primera característica de los dispositivos mecánimos es, justamente, la linealidad. Y gracias a esta última puede ser fructuosa la comparación con la mecánica en el estudio del sistema nervioso, ya que cabe analizar los dispositivos lineales por métodos perfectamente conocidos y de manejo relativamente fácil.

Se dice que un sistema es lineal cuando la *entrada* —en nuestro caso particular, el *estímulo*—, x, está vinculada a la *salida* —como caso particular, la *respuesta*—, y, por una función, $y = f(x)$, que sea solución de una ecuación diferencial lineal con respecto a y y a sus derivadas, siendo las funciones g_0, g_1, ... y h unas funciones dadas de x:

$$y\, g_0(x) + y' g_1(x) + y'' g_2(x) + \ldots = h(x)$$

Además, cuando se habla de un sistema lineal se sobreentiende, por lo general, que no se modifica a lo largo del tiempo: que sus parámetros no cambian, es decir, que se enfrenta uno con una ecuación diferencial *de coeficientes constantes:*

$$A_0 y + A_1 y' + \ldots = B$$

De este modo se manifiesta la propiedad sobresaliente de los sistemas lineales, esto es, la de permitir la reunión de los estímulos y la superposición de las respuestas: gracias a la constancia de los parámetros se puede experimentar por separado con el estímulo a, luego con el b y, por fin, con el $(a + b)$.

Tales sistemas constituyen, pues, un campo en que es posible aplicar el análisis frecuencial: integral de convolución, espectro frecuencial, transformación de Laplace, función de transferencia, espectro energético, autocorrelación.

Pero, sin duda alguna, el sistema nervioso no es un sistema lineal: sus parámetros son funciones de la situación, de modo que no siempre dará la misma respuesta al mismo estímulo, e, incluso en una situación dada constante, los tipos de reacción pueden variar debido solamente a la sucesión de los estados funcionales; las señales débiles, aun cuando se las perciba, son con frecuencia infraliminares con respecto a la actividad integrada del conjunto del organismo, y los estímulos muy enérgicos conllevan respuestas que pueden pertenecer a un orden distinto que el de las provocadas por estímulos de intensidad media; finalmente, se ha podido sostener que la escala de tiempos de los fenómenos nerviosos está cuantificada. Y, cuando nos colocamos a la escala de la neurona, el [fenómeno de] "todo o nada" parece eliminar toda linealidad.

Sentimos la tentación, pues, de rechazar *a priori* en neurología los modelos lineales, y de volvernos preferentemente a los procedimientos no lineales de análisis, propuestos, en particular, por WIENER, SINGLETON, PLATZER y SENDERS. Pero la linealidad presenta tantas comodidades que vale la pena de buscar una forma de aplicarla, dando el rodeo que sea.

A este respecto nos es inapreciable la noción de cuasi linealidad, estudiada por LICKLIDER.

Un sistema *cuasi lineal* es cualquiera que pueda ser descrito con suficiente aproximación por unas ecuaciones diferenciales lineales cuyos coeficientes no puedan variar en el tiempo más que respetando ciertas restricciones: dicha variación no podrá efectuarse más que escalonadamente, o bien con enorme lentitud con relación al período del estímulo. Una vez admitido esto, el comportamiento del sistema comprende dos partes: una lineal, es decir, que satisfaga a una ecuación diferencial lineal de coeficientes aproximadamente constantes, y otra irreductiblemente no lineal. Para que quepa considerar cuasi lineal al sistema es menester que la parte no lineal del comportamiento sea pequeña con respecto a la lineal; orden de magnitud de esta pequeñez que está dictado por el hecho de que al análisis deja de lado la parte no lineal considerándola aleatoria, esto es, incorporándola al ruido. Todo depende, por tanto, de cuánto ruido se pueda tolerar en el problema que se estudie, o sea, de la proporción

$$\frac{\textit{señal}}{\textit{ruido}},$$

o también del reparto de la varianza de la respuesta entre la señal y el ruido.

Estos estudios permiten, pues, considerar dominios limitados, en los que el sistema nervioso se manifiesta como cuasi lineal; con lo cual, por otra parte, la neurología adopta una actitud que no difiere demasiado de la del ingeniero frente a un regulador: pues ningún dispositivo industrial es perfectamente lineal, y no se aplica el análisis lineal más que para seña-

les suficientemente intensas que, sin embargo, se mantengan netamente inferior al límite de sobrecarga.

A la escala de la neurona, la ley de todo o nada que gobierna los impulsos parece ser un obstáculo infranqueable para el análisis lineal. Sin embargo, no se puede asimilar, por ello, la neurona a un sistema de tipo basculante [*flip-flop*]: el impulso no es más que una señal de salida, y se encuentra preparado por fenómenos continuos que —al menos en primera aproximación— pueden considerarse cuasi lineales.

Por ejemplo: en una fibra nerviosa aislada, una excitación infraliminal origina una despolarización local de la membrana, esto es, *un prepotencial no diacrítico,* que aparece y desaparece lentamente y que se propaga atenuándose a las zonas inmediatas de la fibra; en cuanto a su magnitud, es función continua y creciente de la del estímulo infraliminal.

En la neurona, los fenómenos de facilitación y de inhibición que regulan la excitabilidad de la célula son continuos y cuasi lineales: pues el impulso discontinuo que sigue a la aplicación de un estímulo supraliminal no es sino la señal emitida por un sistema para expresar un estado de excitabilidad que hasta aquel momento estaba regulado por fenómenos *cuasi* lineales.

Al nivel de la placa motriz * en reposo, la terminación nerviosa libera constantemente acetilcolina en cuantos multimoleculares, que— sólo por efecto de la agitación térmica— llegan a ponerse en contacto con la membrana, siguiendo un proceso aleatorio. La llegada de los impulsos acelera la producción de los cuantos de acetilcolina de acuerdo con una ley lineal, con lo que se multiplican las eventualidades de impacto; y cuando éstos alcanzan cierta cuota por unidad de tiempo aparece el potencial muscular, que obedece a la ley de todo o nada. Tenemos aquí, por tanto, un fenómeno análogo al que acontece en la fibra nerviosa: el fenómeno no lineal no es más que el final de un proceso lineal.

El impulso está sometido a la ley de todo o nada, y constituye en sí mismo, pues, un fenómeno no lineal; pero los impulsos pueden formar estructuras que obedezcan a leyes lineales. Por ejemplo, en las fibras sensoriales, la intensidad del estímulo modula la frecuencia de los impulsos, y KATZ ha hecho ver la linealidad de la relación que vincula la intensidad del estímulo a la frecuencia de la descarga del receptor. (MATTHEWS había llegado, incluso, a asentar una relación logarítmica entre la frecuencia de la descarga de una fibra aislada provinente de un huso muscular ** de

---

* Esta es, como se sabe, el aparato efector a través del cual se inerva la fibrilla muscular: una especie de saquito en el que acaba la fibra nerviosa, ya sin vaina de mielina, en una arborización con engrosamientos terminales. (*N. del T.*)

** De éste, formado por unas fibrillas musculares especiales rodeadas de una membrana, parten, como es sabido, las fibras aferentes de la sensibilidad propioceptiva relativa a los músculos. (*N. del T.*)

rana y la tensión aplicada al músculo, pero actualmente se discute este resultado.)

Otro ejemplo de cooperación de impulsos en un fenómeno lineal: en la médula, los sistemas reflejos o intercalares bombardean las motoneuronas con impulsos que son siempre infraliminares; la excitabilidad de la neurona varía linealmente hasta el momento en que se llega al umbral, y entonces se produce la descarga sináptica de acuerdo con el principio de todo o nada. Vemos así cómo se intercala un fenómeno lineal entre dos tiempos a base de impulsos (esto es, de elementos no lineales).

Por lo demás, no es seguro que el todo o nada sea obligatoriamente el fundamento de la actividad nerviosa: en el bucle gamma * la regulación es lineal, incluso si no se considera más que una fibra fusomotriz y una fusosensitiva. Cabe que exista allí una infracción de la ley de todo o nada, si bien la cosa es todavía objeto de discusión.

Si se abandona la escala de la neurona aislada para considerar los conjuntos de ellas, interviene la estadística, y se puede hacer aparecer una ley lineal o cuasi lineal que se desprenda del comportamiento de un conjunto de elementos sometidos al todo o nada.

Por ejemplo, en el reflejo de extensión, la contracción de cada unidad motriz obedece al todo o nada, pero para el conjunto del músculo se tiene, gracias al reclutamiento, una relación lineal entre la fuerza que estira el músculo y la contracción con la que éste responde.

Ello es aún más claro en la corteza cerebral. Por ejemplo, en lo que se refiere al condicionamiento, el reflejo condicional es, una vez asentado, un todo o nada, pero su constitución se ha visto precedida de una progresión lineal de la especificidad del estímulo: antes de que se haya conseguido el condicionamiento, un estímulo ligeramente distinto que el que se destine a ser el estímulo condicinal —que, en consecuencia, será el que se utilice habitualmente en las sesiones de condicionamiento— proporciona una respuesta cuantitativamente menor que éste, y tanto más pequeña cuanto más distintos sean los dos estímulos. Así pues, hay una relación lineal entre el estímulo (digamos, por ejemplo, la frecuencia de una sirena) y la respuesta condicional que suscite; pero cuando el condicionamiento está ya formado, el estímulo es rigurosamente específico, es decir, se tiene el todo o nada.

Se sabe asimismo la ley logarítmica que propuso FECHNER para vincular la intensidad del estímulo a la sensación que engendre. Mas como cabe discutir teoréticamente la fórmula de FECHNER, en tanto que se justifica

---

* Este sistema está formado, en esencia, por unas neuronas efectoras de axón muy fino («fusomotrices») que, partiendo de la medula, sensibilizan los husos musculares, y por las neuronas de la sensibilidad propioceptiva muscular («fusosensitivas»), que recogen la información procedente de los receptores situados en aquéllos, la devuelven a la medula y actúan en ella facilitadoramente sobre las neuronas efectoras de axón grueso (neuronas alfa), que son las motoras. (*N. del T.*)

por sus aplicaciones prácticas, no estará mal que nos extendamos un poco sobre este punto.

LA FORMULA DE FECHNER

Todos sabemos, sin haberlo aprendido, que, dado un estímulo (una luz, por ejemplo, o un sonido), no se percibe una variación suya más que si no es demasiado débil con respecto a él. Sea una habitación iluminada por una araña de seis bombillas; en cuanto se apague una de ellas, un sujeto que se encuentre en la habitación se apercibirá del incidente sin necesidad de mirar la araña; pero si en ésta hay ciento cincuenta bombillas, la extinción de una pasa completamente inadvertida.

Estos hechos de sentido común han sido estudiados experimentalmente y han recibido una expresión cuantitativa.

Sea I la intensidad de un estímulo (una intensidad luminosa, por ejemplo). Se llama *umbral diferencial* a la cantidad mínima en que tiene que variar I para conseguir un nuevo estímulo justamente discernible del primero; sea U el umbral diferencial; la experiencia muestra que, en primera aproximación, U es proporcional a I:

$$U = KI$$

siendo K una constante cuyo orden de magnitud es de 1/100 para la sensación visual y de 1/5 para la auditiva.

FECHNER presentó esta ley bajo otra forma al formular la hipótesis siguiente: la diferencia entre las sensaciones engendradas por dos intensidades del estímulo justamente discernibles es la misma cualquiera que sea la intensidad. Dicho de otro modo, cuando se hace variar una intensidad de I_1 a $(I_1 + KI_1)$ se obtiene la misma variación de sensación que cuando la intensidad pasa de I_2 a $(I_2 + KI_2)$: en ambos casos, cuando la intensidad ha variado en una cantidad KI, la sensación ha variado la misma cantidad, a la que se llama un *escalón diferencial.*

De hecho, es preferible retirar a lo que se llama "la hipótesis de Fechner" su carácter hipotético: si la concepción de este psicólogo es una hipótesis, carece de significado, por no ser "operativa", por no poder conducir a ninguna verificación experimental; pues la sensación, que es un hecho de conciencia, no puede formularse a base de materia y energía, no puede ser mensurable ni figurar como cantidad de ninguna ecuación; lo que es mensurable es la intensidad del estímulo (por ejemplo, si es vibratorio, mediante el cuadrado de la amplitud).

Es preferible considerar la "hipótesis de Fechner" como una *definición,* mediante la cual este autor define una magnitud, S, a la que llama "sensación", pero que no es la sensación de nuestra conciencia.

Sea un estímulo de intensidad I, e incrementemos esta intensidad en d*I*. Sea d*S* el incremento correspondiente de la "sensación" *S*; para medirlo se puede emplear como unidad el escalón diferencial, ya que éste (la cantidad en que varía *S* cuando *I* varíe en *KI*) es el mismo, por definición, cualquiera que sea *I*. Una simple regla de tres hace ver que si *S* varía en un escalón cuando *I* varíe en *KI*, variará en $\frac{dI}{KI}$ escalones cuando *I* varíe en d*I*; lo cual se escribe así:

$$\frac{dS}{dI} = \frac{1}{KI}$$

y, por integración inmediata,

$$S = \frac{1}{K} \log_e \frac{I}{I_0}$$

siendo I_0 el *umbral absoluto,* o sea, la máxima intensidad que no dé lugar a ninguna sensación.

Esta ecuación recibe el nombre de "ley de Fechner". Es más conveniente llamarla "fórmula de Fechner", ya que no hace sino presentar en una forma distinta la ley de Bouguer-Weber, una vez que se ha definido la magnitud *S* —que, según es preciso recordar, no representa la sensación tal y como se la define clásicamente a base de la conciencia.

Decir que "la sensación es igual al logaritmo de la excitación" carece de significado operativo, en tanto que decir que "la magnitud *S*, definida por FECHNER, se mide por el logaritmo de la intensidad del estímulo" es una fórmula correcta.

Verdaderamente, puede plantearse todavía una objeción: la de que la constancia de *K* para las distintas intensidades no es verdadera más que en primera aproximación. Más exactamente, *K* varía con *I*, es una función f(*I*), de modo que la fórmula de Fechner debería escribirse:

$$S = \int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I\, f(I)}$$

cosa que nos dice mucho menos.

Pese a estas críticas de principio, la fórmula de FECHNER conserva cierto valor.

Cada vez que tiene que considerarse la incidencia psíquica de un agente físico, no puede dudarse de que tiene grandes ventajas atender, más que a la intensidad del estímulo, al logaritmo de tal intensidad; cosa que se desprende, en particular, del frecuente uso que se hace de la noción de *bel* o *belio.*

Para apreciar, por ejemplo, una intensidad sonora, cabe utilizar el cuadrado de la amplitud de la vibración, de conformidad con la definición física; pero como la ley de Bouguer-Weber (en la expresión que le da la fórmula de Fechner) nos hace ver la superioridad de la función logarítmica, cuando se considera el sonido en sus relaciones con la sensación y la vida psíquica se adopta, para caracterizar las intensidades sonoras, la unidad llamada *belio:* ésta se define como el logaritmo de la relación de dos energías sonoras (es decir, de los cuadrados de dos amplitudes):

$$\log \frac{A^2}{A_0^2}, \text{ o bien } 2 \log \frac{A}{A_0}$$

siendo A la amplitud del sonido y A_0 un nivel de referencia establecido previamente, por ejemplo, el umbral absoluto. Es frecuente emplear más a menudo un submúltiplo del *belio:* el *decibelio,* que vale una décima parte de aquél.

Vemos así que un resultado de la psicología teorética ha podido llevar a una formulación que hoy es de uso corriente en distintas ramas de la industria, y, en particular, en la telecomunicación.

Podemos pensar, pues, que la fórmula de FECHNER está justificada por sus aplicaciones, y que, en consecuencia, la repercusión sobre el comportomiento de la estimulación de un receptor periférico constituye un fenómeno lineal.

LAS PRUEBAS DE SEGUIMIENTO

Existe, por fin, un dominio en el que la noción de cuasi linealidad parece abrir grandes posibilidades de análisis: es el de las *pruebas de seguimiento.*

Una prueba de esta índole consiste esencialmente en pedir al sujeto que, con un índice que se desplaza a lo largo de un carril, siga un objetivo cuya posición varíe (sobre un eje paralelo al carril) según leyes diversas.

En tales pruebas, el hombre se comporta como un regulador: el sistema regulado es el conjunto de índice y objetivo, la magnitud de entrada es la velocidad de desplazamiento del índice, y la de salida es la distancia que separe a éste de su objetivo (su valor según la consigna ha de ser cero); el hombre es el regulador: para él, la magnitud de entrada es la distancia citada, y la de salida, la velocidad que imprima al índice.

Se trata de una situación artificial, realizada en el laboratorio, pero no está nada lejos de lo que sucede en muchas acciones humanas, como trazar un surco o cortar una pieza de tela, por no hablar del manejo de mandos en la industria moderna. El hecho de que haya sido posible

enfocar esta actividad de seguimiento mediante modelos cuasi lineales —aun cuando este enfoque sea todavía muy imperfecto— abre para el análisis un tipo de gesto humano de enorme generalidad.

Cabe llevar a cabo tal enfoque de dos maneras distintas.

Primeramente puede someterse el objetivo a un desplazamiento instantáneo (conservándolo inmóvil antes y después de dicho desplazamiento): se trata de lo que se llama un *escalón.* El sujeto reacciona con un desplazamiento del índice, al que se denomina *respuesta en escalón.*

Se puede representar todo esto llevando en un gráfico el tiempo en abscisas y los desplazamientos en ordenadas (fig. 1); y en este caso se utiliza la *forma de la onda.*

Es fácil comprobar que, en general, existe cierto tiempo perdido, durante el cual el índice no se mueve; luego va a superponerse al objetivo, trazando una especie de línea exponencial. El conjunto no es lineal, puesto que consiste en la sucesión de dos tiempos que difieren en cuanto a su mecanismo: en primer lugar el paso de los impulsos a través del sistema nervioso hasta que se desencadene la reacción motriz, y después la continuación (coordinación, regulación) de esta acción.

La segunda parte se presta bastante bien al análisis, hasta por simple examen de la forma de la onda. Pero se trata de un análisis que PHILIPPS ha efectuado especialmente a fondo en el *dominio del tiempo;* y también HICK ha analizado el tiempo de reacción, haciendo ver que depende de la variedad que haya de respuestas equiprobables,

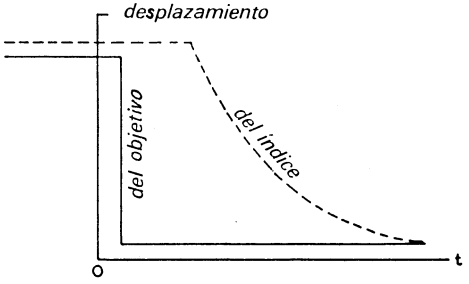


Fig. 1. Desplazamientos del índice y del objetivo en una prueba de seguimiento humano.

es decir, de las estrategias que se le ofrezcan al sujeto sometido a experimentación para responder al desplazamiento del objetivo. MAYNE ha imaginado un modelo del seguimiento humano en forma de conjunto que comprenda un navegante y un piloto automático: éste funciona en ciclo cerrado y es aproximadamente lineal, pero el navegante fija a veces un nuevo rumbo, lo cual cambia las características del ciclo; el conjunto del sistema es, por lo tanto, discontinuo, como la respuesta de escalón del seguimiento aludido.

EL ANALISIS FRECUENCIAL

Podemos derivar otro enfoque cuasi lineal del análisis *frecuencial:* su principio consiste en la descomposición de la forma de la onda en una infinidad de sinusoides. Cada una de ellas es una oscilación elemental, que puede expresarse por la cantidad imaginaria, perfectamente conocida,

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$$

Cada oscilación elemental se encuentra afectada por un coeficiente imaginario, y se llama *espectro* la función imaginaria que establece una relación entre estos coeficientes y las frecuencias correspondientes (de la infinidad de sinusoides en que se descomponga la forma de la onda).

Esta última expresa la respuesta en el *dominio del tiempo;* para hacerlo en el dominio de la frecuencia se emplean la transformación de Fourier o la de Laplace.

Se llama *función de transferencia* la transformada de Laplace de un impulso de respuesta *.

Todas estas formas de análisis requieren cálculos y trazados complicados, y se facilitan mucho empleando computadoras; pero cabe simplificarlos haciendo que el objetivo no se desplace en escalón, sino siguiendo la resultante de varias sinusoides superpuestas: de este modo se sabe de antemano que el análisis frecuencial no tendrá que tomar en consideración más que un número finito de frecuencias, lo cual facilita en gran medida las cosas.

Un ejemplo de análisis frecuencial conduce a proponer como modelo el *servomecanismo condicional* de Elkind: este modelo funciona como un circuito abierto en tanto que la salida esté adaptada a la "intención" que guíe al sistema, pero toda discrepancia entre la salida y tal intención lleva consigo la aparición de una realimentación negativa.

Se trata de un modelo que no deja de estar emparentado con el regimiento por realimentación de los parámetros, esto es, por conservación o eliminación de las adaptaciones efectuadas a través de tentativas y errores. Uno de los aspectos más importantes del comportamiento humano es

---

* Como es sabido, dada una función $r(t)$ continua en el intervalo $[0, \infty]$, su transformada de Laplace es —si existe— la función del parámetro ρ, η (ρ), que se obtiene al integrar 0 e ∞ el producto de la función dada por e^{-pt}. La transformación de Laplace convierte las operaciones de derivación e integración en las de multiplicación y división, y por ello permite resolver algebraicamente (valiéndose de tablas directas e inversas de transformadas de Laplace) las ecuaciones y los sistemas diferenciales lineales. Además, la transformada de Laplace de parámetro «imaginario puro» tiene por componentes —supuestas las condiciones de existencia pertinentes— los «espectros continuos» de la función, esto es, las funciones constituidas por los coeficientes de la descomposición (de la función dada) en serie de Fourier expresados en función de la frecuencia (y multiplicados por una constante). (N. DEL T.)

hacer que estas adaptaciones sean lo más eficaces posible y fijarlas una vez así llevadas a su forma óptima. (Es sabido el desarrollo que ha dado ASHBY a este modo de enfoque.)

Así pues, aun cuando el sistema nervioso no sea lineal, es posible comenzar su análisis en primera aproximación atacándolo por los puntos en que pueda ser considerado que lo es. Se trata de una posibilidad que está lejos de haber sido explotada a fondo, y ha de ser muy fructífero proseguir tal ruta; aunque, sin duda alguna, llegará un momento en que habrá que continuar con los métodos, menos fáciles, del análisis no lineal.

RESUMEN

Por desdicha, el estudio por asimilación a servomecanismos y a dispositivos autorregulados tropieza con el obstáculo de la falta de linealidad.

En efecto, la teoría matemática de estos mecanismos supone que se trata de elementos en circuito [*de boucle*] que obedecen a los principios de la progresividad y de la superposición de las causas y los efectos elementales; esto es, que las relaciones entre las magnitudes de entrada y las de salida tienen que satisfacer unas ecuaciones diferenciales que no sólo sean lineales, sino incluso de coeficientes constantes en el tiempo (circuito lineal).

Es completamente evidente que semejante modelo no puede aplicarse sin precauciones al sistema nervioso: a la escala de la neurona existe un umbral de excitación que se opone a la superposición de las causas y los efectos; y a la escala del individuo, el complejo comportamiento de los vertebrados superiores consigue precisamente su complejidad en virtud de no satisfacer los requisitos de la linealidad.

Pero se pueden realizar experimentos en los que, dentro de ciertos intervalos, el comportamiento humano tenga, en el laboratorio, una linealidad suficiente para que podamos derivar de ellos la noción de cuasi linealidad. En concreto, éste es el caso cuando los parámetros varían de vez en cuando bruscamente, por escalones; o bien, por el contrario, cuando lo hacen con la suficiente lentitud para que se los pueda considerar constantes durante un intervalo temporal limitado (las variaciones pequeñas se incorporarán al ruido de fondo). Por lo demás, incluso en la industria, no hay dispositivos perfectamente lineales, en especial en las proximidades de los límites de su uso.

Como el análisis no lineal no nos ofrece por ahora más que instrumentos de manejo más difícil, parece que actualmente es posible emplear el análisis lineal, si bien en situaciones bien delimitadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASHBY, W. R., (1961): *Design for a Brain.* Londres, Chapman and Hall [versión castellana. *Proyecto para un cerebro.* Madrid, Tecnos, 1965].

HICK, W. E., (1951): Man as an element in a control system. *Research, 4,* 112-118

LICKLIDER, J. C. R., (1960): Quasi linear operator models. *Developments in Mathematic Psychiatry,* ed. de R. D. LUCE. Chicago, Free Press of Glencoe.

MAYNE, R., (1951): Some engineering aspects of the mechanism of body control. *Electrical Engineering, 70,* 207-212.

NAYRAC, P., (1962): *Eléments de Psychologie.* París, Flammarion.

PHILIPPS, R. S., (1947): *Theory of Servomechanisms.* Nueva York, McGraw-Hill.

WIENER, N., (1949): *Informal Lectures on Nonlinear Net Work Analysis.* Nueva York, Wiley.

Las máquinas adaptativas en psiquiatría

Por J. H. CLARK

LAS MAQUINAS DE ENSEÑAR Y LOS MECANISMOS DE REGIMIENTO

A. Los sistemas de regimiento

La finalidad del comportamiento adaptativo que conserva dentro de ciertos límites unas variables esenciales, tales como la tensión sanguínea y la temperatura del cuerpo, es la supervivencia (ASHBY, 1960). Vamos a emplear el símbolo ashbiano de una esfera con marcas de limitación y su aguja indicadora (fig. 1).

La calibración (el regimiento sin realimentación) sólo funciona cuando el medio no cambia (fig. 2). La realimentación (fig. 3) procedente del me-

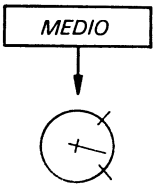


Fig. 1. Una variable esencial.

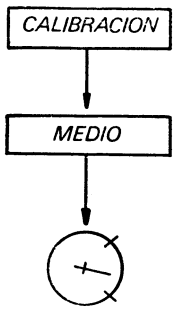


Fig. 2. La calibración

dio es análoga a una serie de preguntas (P) a las que el elemento regidor responde (R) de acuerdo con las reglas de comportamiento (P, R). Y las respuestas acertadas (RA) mantienen las variables esenciales dentro de sus límites.

La realimentación negativa (ASHBY, 1956) se utiliza en los regidores [*controllers*] automáticos (PASK, 1961), tales como pilotos automáticos, termostatos, el regulador de Watt (ASHBY, 1960) y la cola orientadora de Edmund Lee en los molinetes (WAILES, 1954). Estos dispositivos automáticos necesitan que el medio varíe en forma previsible.

Los regidores ultraestables (ASHBY, 1960) encuentran una respuesta acertada (RA) a una pregunta (P) no prevista ensayando aleatoriamente nuevas reglas, independientes entre sí, hasta dar con una apropiada (P, RA) (figura 4), que se conserva luego mientras lo sea. El generador de reglas (que corresponde aproximadamente al conjunto ashbiano de funciones escalonadas) actúa cuando las variables esenciales exceden alguno de sus límites.

Conviene consultar la propia descripción de ASHBY (1960), ya que me he aventurado a separarme de ella.

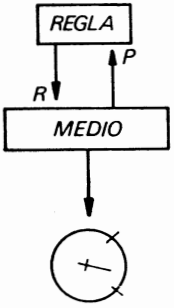


Fig. 3. La realimentación

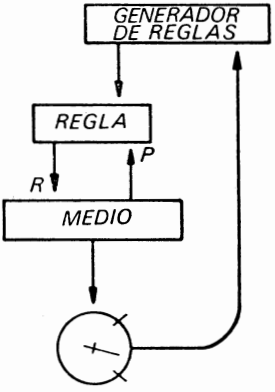


Fig. 4. El regidor ultraestable

B. Los sistemas que aprenden

Las situaciones recurrentes (ASHBY, 1960) son medios que repiten la misma pregunta (P). La acumulación de las adaptaciones es un almacenamiento económico, efectuado por un regidor, de las reglas apropiadas (P, RA), que cuando cambie el medio podrían continuar siéndolo (fig. 5).

El aprendizaje es el proceso de encontrar, almacenar y emplear de nuevo reglas apropiadas (P, RA); y la psicología y la neurofisiología lo estudian como uno de sus problemas centrales.

Utilizamos el símbolo "almacén de reglas" para indicar la posibilidad de aprender: allí se almacenan las reglas que tengan éxito, esto es, las apropiadas (P, RA). Más tarde puede buscarse en este almacén la regla apropiada a cada pregunta (P), y la respuesta que se siga de ella (R) puede seguir siendo acertada (RA), según sean los cambios sufridos por el medio.

Una colección de reglas apropiadas (P, RA), que se hayan obtenido a partir de un medio y se encuentren en un almacén de reglas, forman un "modelo" de tal medio.

Definimos al alumno como un regidor ultraestable, dotado de un alma-

cén de reglas, que aprenden [cómo es] el medio con vistas a regirlo, y [al que hay que adscribir] un índice de errores (I), que será la variable esencial de un sistema que aprende.

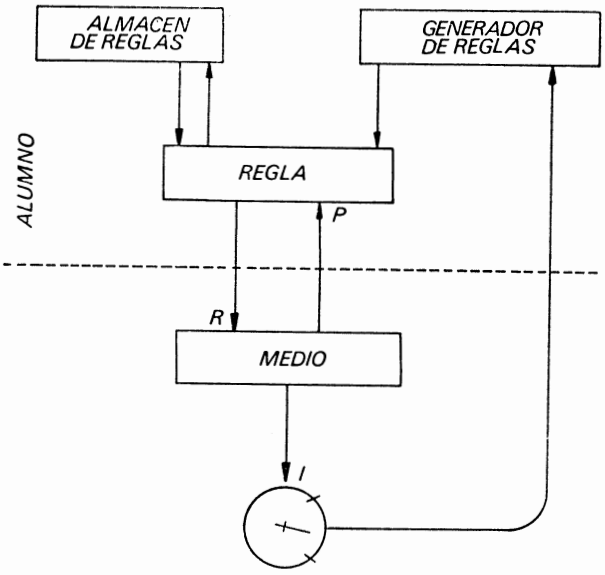


Fig. 5. La acumulación de adaptaciones.

Muchos medios presentan una estructura serial: sus distintas partes están enlazadas como en una cadena (fig. 6).

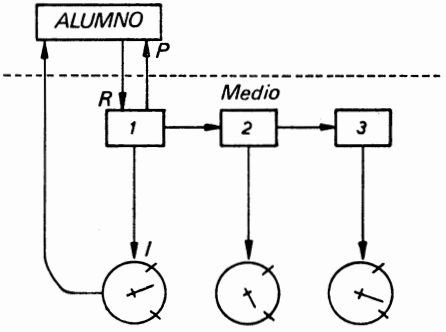


Fig. 6. La adaptación en serie.

Una adaptación en serie (ASHBY, 1960) es un método de habérselas con semejante medio: el regimiento de las partes de éste se efectúa en el orden en que estén en la serie. Así, en la figura 6, el orden para la adaptación en serie es: parte 1, luego la 2, después la 3, etc.

C. Los sistemas que enseñan

Definimos al profesor como aquella parte del medio del alumno que le ayude a aprender (fig. 7); hemos indicado la cooperación entre ambos haciendo que compartan la variable esencial y el índice de errores (I).

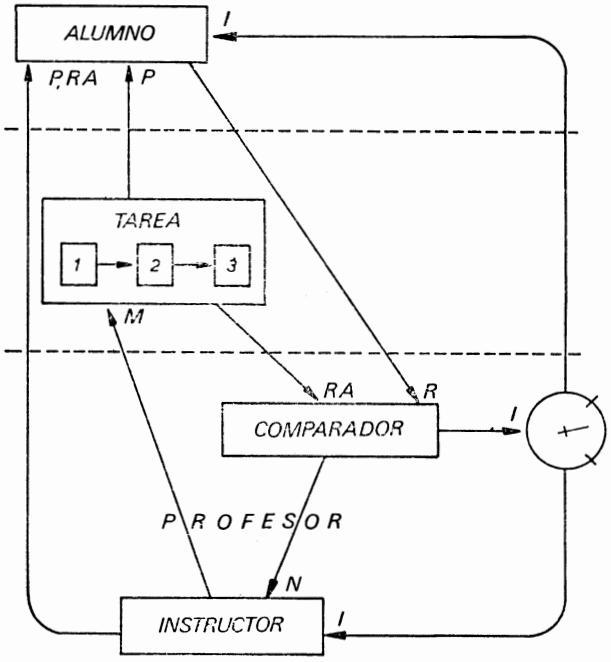


Fig. 7. La enseñanza.

Definimos la tarea como la parte del medio del alumno que "haya de aprenderse" (el índice de errores, I, se refiere a este proceso de aprender la tarea). La mayoría de las tareas son *seriales,* esto es, tienen una estructura en serie, tal como hemos simbolizado en la figura 7.

Así pues, el profesor actúa como instructor y como comparador.

D. Los mensajes de enseñanza

A partir de la figura 7 podemos hacer una lista de los mensajes que se intercambian entre el alumno, el profesor y la tarea:

1) el instructor envía al alumno unas reglas apropiadas (P, RA);
2) la tarea propone las preguntas (P) al alumno;
3) el alumno da las respuestas (R) al comparador;

4) la tarea envía respuestas acertadas (RA) al comparador;
5) el comparador envía el índice de errores (I) al alumno;
6) el comparador envía el índice de errores (I) al instructor;
7) el comparador envía la naturaleza del error (N) al instructor, y
8) el instructor modifica (M) la estructura serial de la tarea.

E. Enseñanza y aprendizaje

En esta fase se produce una reciprocidad: tanto el profesor como el alumno aprenden (lo que se aprende da origen a una simetría). Pues el alumno aprende la "tarea", pero asimismo cómo la enseña el profesor, y éste aprende la "tarea" (si bien lo hace antes de enseñarla al alumno) y también cómo la aprende el alumno.

Hemos de tener en cuenta que la distinción entre la tarea, el alumno y el profesor puede no ser obvia: es posible que el observador se vea obligado a hacer definiciones arbitrarias (PASK, 1961).

F. Las máquinas de enseñar

Las máquinas de enseñar consisten en aparatos (LUMSDAINE y GLASER, 1960) cuya función es la de manejar uno o más de los ocho tipos de mensajes arriba enumerados.

Las máquinas de enseñar más sencillas incluyen ciertos instrumentos de enseñanza:

a) [Tejeduría de] tapices. En este caso la tarea serial consiste en actuar con el mensaje 1 —o sea, la entrega al alumno de unas reglas apropiadas (P, RA), esto es, de datos, aserciones, "información".

b) Discos de gramófono de los sonidos cardíacos, normales y anormales. La tarea serial es como la de *a*).

c) Para este tipo pueden emplearse tratados modernos, como el de KEMENY, SHELL y THOMPSON (1957). En este caso la tarea serial consta del mensaje 1 —reglas apropiadas (P, RA), o sea, datos y pistas (o asomos) de "información parcial" (PASK, 1961)— y de los mensajes 2 y 4 (pues el alumno se sirve de comparador a sí mismo).

Las máquinas de enseñar en sentido propio proporcionan el mensaje 8; entre ellas se encuentran:

a) Las máquinas skinnerianas * típicas (SKINNER, 1960). La tarea serial consiste en manejar los mensajes 1-6 y 8.

---

* Se trata de unos dispositivos mediante los que se va presentando al alumno linealmente una sucesión de informaciones cada una de las cuales acaba en una pregunta (tan sencilla que sea prácticamente imposible un error), y que impiden el paso de cada información a la siguiente hasta que no se haya contestado irrevocablemente la pregunta con que termine aquélla. *(N. del T.)*

b) Los manuales revueltos * de CROWDER, tales como *The Arithmetic of Computers* (1962). La tarea serial consiste en manejar los mensajes 1 a 8 (no todos ellos son manifiestos, pero se encuentran implícitos en la forma en que se suceden las páginas revueltas; en cuanto a los 7 y 8, están encarnados a lo largo de rutas de alternancia a través de la tarea).

c) Los monitores automáticos de PASK para la enseñanza de destrezas neuromusculares **, tales como el aparato SAKI, que enseña a perforar tarjetas. La tarea serial reside en manejar los mensajes 1 a 8.

La mayoría de las máquinas de enseñar están alojadas en cajas, a las que se mira, evidentemente, como "máquinas", si bien los manuales revueltos crowderianos pueden efectuar la mayoría de las funciones de enseñar.

El tiempo, sin embargo, tiene mucha importancia en la enseñanza de destrezas neuromusculares, tanto en lo que se refiere a las preguntas (P), como a las respuestas (R) y a las respuestas apropiadas (RA); y la puntuación de errores (E) puede adoptar la forma de puntuaciones múltiples y acumuladas relativas al tiempo de respuesta (PASK, 1961). Estas máquinas necesitan una caja o armario para alojar los botones, relojes y dispositivos de almacenamiento múltiple.

G. Los programas de las máquinas de enseñar

Dando por supuesto el libro, la caja o el aparato que sea, un programa comprende una tarea, una estructura en serie de ésta, unas reglas de enseñanza del comparador y unas reglas de enseñanza del instructor.

La *programación* es el proceso de llegar a un buen programa, es decir, a uno que enseñe bien la tarea. Todos los programas se logran a través de tentativas y errores, valiéndose de grupos muy grandes de alumnos: se calcula el índice de los errores que cometan y se estudia la naturaleza de éstos; se modifica luego el programa y se lo ensaya otra vez; y así sucesivamente.

Así pues, la programación es un proceso ultraestable cuyo índice de errores (I) es bajo en el caso de casi todos los alumnos, y cuyas variables esenciales son aquel índice y estos alumnos. Como se conservan los perfeccionamientos se trata también de un proceso de aprendizaje.

Los programas finales y aceptables, basados en los resultados medios

---

* Son libros de enseñanza cuyas páginas acaban en preguntas que, según la respuesta que se les dé, remiten a unas u otras páginas (en las que se explica el error cometido o las razones por las que se ha acertado, según sea el caso); y se llaman *revueltos* porque, para evitar que el alumno adivine en qué página está la respuesta exacta y no se esfuerce por darla, el texto «se salta» páginas hacia adelante o hacia atrás. (*N. del T.*)

** Son máquinas a su vez adaptativas que varían el curso y la dificultad en cada instante de la tarea, adaptándose a la perfección o defectos con que la vaya ejecutando el alumno. (*N. del T.*)

de muchos alumnos anteriores, se encarnan en las máquinas de Skinner y los manuales revueltos de Crowder.

Los monitores automáticos de Pask, tales como el SAKI, poseen programas que no están tan fijados, sino que son sensibles a cada alumno individual: en ellos están incorporadas reglas de enseñanza múltiples, que modifican la tarea y proporcionan una información parcial, de acuerdo con las respuestas (A) del alumno, múltiplemente almacenadas.

Los programas de Skinner intentan siempre reducir los errores del alumno, en tanto que los de Pask pretenden a veces aumentarlos a corto plazo, como cuando la tarea lanza un desafío mayor al alumno, para mantener su interés; de este modo existen en alternancia una competencia y una colaboración que hacen la interacción muy "viva".

LAS SITUACIONES DE ENSEÑANZA EN PSIQUIATRIA

A. Médicos y enfermos

Los psiquiatras (y otros médicos) tienen que regir al enfermo para que los síntomas —que son las variables esenciales—se mantengan dentro de unos límites (fig. 8).

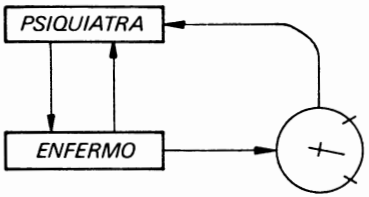


Fig. 8. La psiquiatría.

El médico y el enfermo, sin embargo, alternan en los papeles de alumno y profesor (consúltese de nuevo la fig. 7).

El tratamiento es la presentación por el médico de una tarea; el paciente —ahora alumno— se adapta a su medio, que se modifica en lo que respecta a medicinas, clínica, enfermeras, operaciones, etc. Un tratamiento con éxito origina en el enfermo unos cambios adaptativos que reducen sus trastornos y los síntomas correspondientes; la diagnosis es la clasificación por el médico de su propio "modelo" (interno) del enfermo y de sus trastornos, y el tratamiento con éxito se basa en una clasificación adecuada.

Cuando recibe la historia del enfermo y cuando lo examina, el médico es el alumno, que aprende acerca de aquél (forma un "modelo" de él y de sus trastornos).

Las indagaciones especiales amplían el examen por medio de instru-

mentos, como en la radiografía, o de técnicas normalizadas, como en las pruebas de inteligencia.

B. El criterio

Los médicos y los enfermos se envían mutuamente mensajes mediante palabras y expresiones faciales, mediante operaciones quirúrgicas, fármacos, fisioterapia, etc. Los seres humanos disponen de la variedad [de recursos] que se requiere (ASHBY, 1956) para habérselas con tan variados y sutiles mensajes.

Para que las máquinas de enseñar puedan reemplazar a los médicos humanos en alguna situación tienen que ser capaces de habérselas con toda la variedad de mensajes (de tipo 3) que envíe el enfermo.

Este criterio limita la elección de las situaciones psiquiátricas que se pueden tratar con las máquinas de enseñar actuales.

La elección múltiple de posibles respuestas (R) constituye un ejemplo de una variedad de mensajes limitada automáticamente que se emplea con frecuencia en tales máquinas (LUMSDAINE y GLASER, 1960).

LAS MAQUINAS DE ENSEÑAR EN PSIQUIATRIA

A. Enseñanza

Convendría que los enfermos retrasados mentales sacasen partido de la enseñanza [*education*] impartible mediante máquinas de enseñar, en las que podrían incorporarse la mayoría de sus necesidades especiales al aprender, tales como:

a) serialidad de las tareas,
b) presentación del índice obtenido,
c) ayuda constante en las respuestas,
d) reiteración de las respuestas acertadas ya aprendidas [*overlearning*] y
e) acentuación al principio del carácter de acertado frente al de rápido.

(Véase la revisión de CLARKE y CLARKE, 1958, de las necesidades especiales en cuanto a enseñanza de los alumnos retrasados.)

Podrían programarse tareas tanto verbales como no; consúltese la versión que de una tarea no verbal para niños en edad preescolar da HIVELY (1960).

La enseñanza de la pisiquiatría a los estudiantes podría hacerse mediante máquinas de Skinner. Es posible que, durante la programación, la prueba del ácido de la comprensión de los alumnos (que quedaría señalada por los índices de errores) condujese a una versión revisada, en particular, de las neurosis de apariencia nihilista. Sin embargo, semejante poda de la

teoría de las neurosis podría tener el efecto de empeorar aún más el poco acuerdo que hoy existe entre los psiquiatras en cuanto a diagnosis (véase KREITMAN, SAINSBURY *et al.*, 1961).

B. Terapia

1) Inducción hipnótica

Hemos analizado en un trabajo anterior (CLARK, 1961) la inducción hipnótica con vistas a su mecanización, y hemos advertido que las preguntas (P) que se dirigen al sujeto son acciones físicas y palabras:

a) Las acciones físicas empleadas por los hipnotistas son fijación de la mirada, toque, pases con contacto, pases sin contacto y elevación de las extremidades.

b) Los temas que suscitan son los de los ojos, el cuerpo, el sueño, la visión, el pensamiento, la respiración y la audición.

c) También utilizan cierta gramática, pues sus frases siguen la sucesión: preguntas, aserciones públicas, órdenes y aserciones privadas.

d) Las respuestas (R) del sujeto no son verbales. Hemos estudiado la electromiografía y el ritmo respiratorio como canales de realimentación adecuados que podrían ser utilizados por una máquina de enseñar, valiéndose de comparadores idóneos.

e) Asimismo hemos estudiado las restricciones impuestas por los receptores sensoriales y el contenido informativo y energía de los estímulos (P).

Hemos llegado a la conclusión de que una máquina de enseñar que combinase los rasgos de las de Skinner y las de Pask podría manejar las preguntas (P) y respuestas (R) que se necesitan para inducir la hipnosis.

Las acciones físicas podrían imitarse con dispositivos sencillos.

Las palabras, los temas y la gramática podrían introducirse en cintas [magnéticas] dispuestas de suerte que formasen una tarea de orden flexible (Hemos considerado la inducción hipnótica como una situación de enseñanza, en la que el sujeto aprendería la tarea de entrar en el estado hipnótico.)

2) La terapia del comportamiento

EYSENK (1960) ha reunido las versiones de este método de tratamiento dadas por WOLPE y por otros muchos autores; la idea fundamental es la de sustituir el *comportamiento no adaptativo* (tal como el que es visible típicamente en las fobias) por otras pautas [de comportamiento] más útiles.

El principal método de WOLPE consiste en presentar al enfermo una tarea serial o *jerarquía* de estímulos nocivos (así, a un paciente que tenga fobia a los gatos se le podría presentar la palabra GATO en una papeleta,

luego una fotografía de un gato, etc.: los primeros estímulos guardan una relación muy lejana con los gatos reales, de modo que suscitan muy poca ansiedad); se produce una *desensibilización,* y el enfermo aprende a aceptar las preguntas (P) sin dar respuestas (R) que indiquen (fig. 7) demasiada ansiedad (I); además pueden inducirse simultáneamente estados afectivos [*emotions*] agradables, con objeto de reducir la ansiedad por *inhibición recíproca.*

La *terapia de aversión,* que se emplea típicamente contra el alcoholismo y el fetichismo es exactamente opuesta: ahora el objeto es aumentar la ansiedad vinculada al alcohol o a la cosa fetiche, lo cual se consigue proporcionando estímulos desagradables cuando se presentan aquéllos.

La realimentación de las respuestas (R) suele ser verbal o visual (el médico observa al enfermo).

En el estadio de programación se han utilizado los cambios de resistencia [eléctrica] de la piel cuando se preparaba la *jerarquía* con ayuda del enfermo.

Hay ocasiones en que se permite al enfermo cierto mando sobre los estímulos nocivos.

A veces se presenta el tropiezo de que el paciente recorre la *jerarquía*

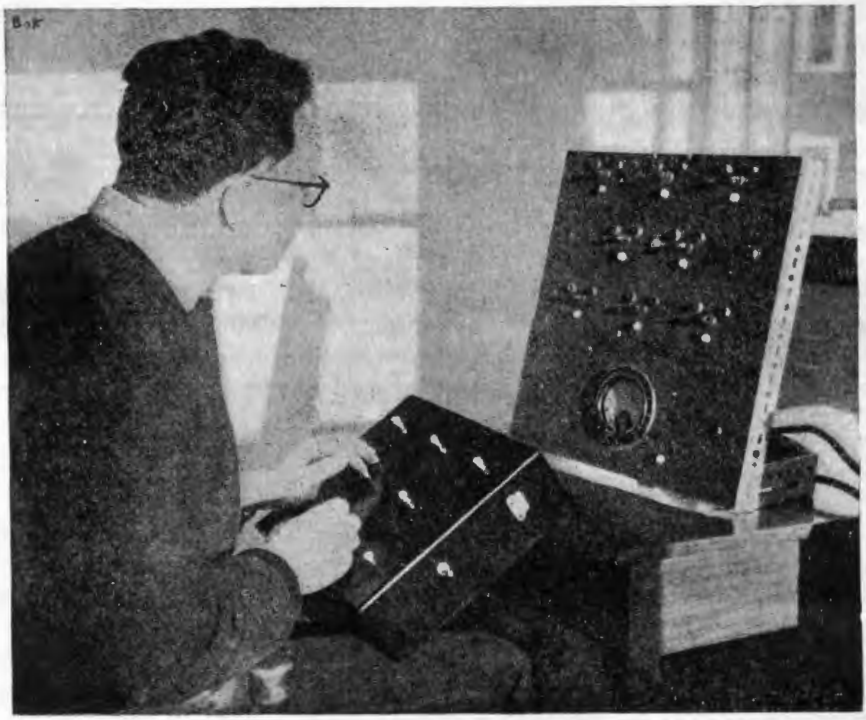


Fig. 9. Sujeto normal jugando al *Juego de los caballos.*

(la tarea serial) demasiado de prisa, y se le produce una ansiedad excesiva, lo cual hace retroceder el tratamiento.

Mi opinión es que estos métodos podrían perfeccionarse empleando una realimentación más fisiológica y mayor mando voluntario del enfermo sobre el orden de la serie, la intensidad y la duración de los estímulos, y que podría enriquecerse el programa, actualmente de naturaleza skinneriana, mediante cierta flexibilidad paskiana.

3) La terapia ocupativa

BARTON (1959) ha subrayado la importancia de esta terapia: los enfermos psiquiátricos, incluyendo los retrasados mentales, la necesitan. En ella están incluidas muchas actividades, desde aprender un oficio a los simples juegos.

En el otoño de 1958 le pedí al señor Gordon Pask que proyectase una máquina de enseñar a modo de juego, a lo que accedió; y ayudado del señor Brian D. Corbett, ingeniero electrónico, he construido [sobre su proyecto] el *Juego de los caballos,* que fue presentado el 13 de marzo

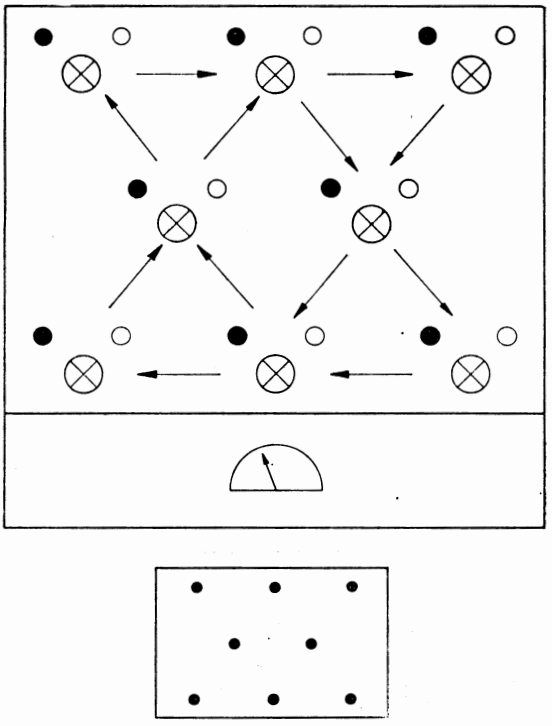


Fig. 10. Tablero y caja de mando del *Juego de los caballos.* Para la explicación véase el texto.

de 1959 y se utilizó en un experimento piloto durante abril y mayo del mismo año (véase más abajo).

En la figura 9 pueden verse la caja de mando, el tablero y un sujeto normal jugando al *Juego de los caballos.* En la figura 10 se representan esquemáticamente la caja de mando y el tablero, en tanto que la 11 muestra las partes principales de la máquina.

El juego consiste en añadir más "heno" a un campo apretando un botón de la caja de mando; ello anima a dos "caballos" (visibles en forma de un círculo negro y otro blanco en la fig. 10) a desplazarse hasta el "punto" del campo en que haya este alimento suplementario. El círculo con un aspa que se ve en cada punto es una lámpara cuya intensidad, al variar, indica la cantidad de alimento ("hierba" más la cantidad de heno que se haya dejado) que hay en el punto correspondiente. Los caballos

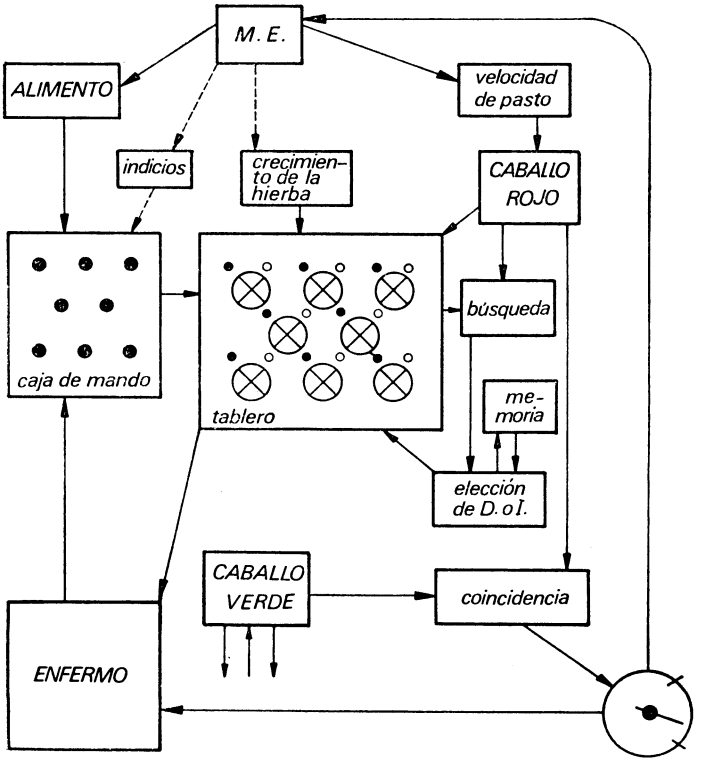


Fig. 11. Diagrama del *Juego de los caballos.*

se mueven a lo largo de los caminos marcados con flechas, y sus movimientos se aprecian gracias a una luz conveniente que pasa a lo largo del camino de un punto a otro (luces representadas por los círculos blancos

y negros). (En la fig. 9 se advierte en cada "punto" una tercera lucecita, que, como era redundante, se ha omitido de la fig. 10.) Aun cuando en la figura 10 las luces de los caballos se representan en negro y blanco, en realidad son rojas y verdes, según están rotuladas en la figura 11.

Los caballos tienen reglas de *comportamiento* idénticas pero independientes: van hacia el punto que tenga más alimento, saliendo de uno de los cuatro puntos preferentes (fig. 10), pero una memoria a corto plazo les hace preferir unos caminos determinados, ya que tienden a elegir "izquierda" o "derecha", de acuerdo con la elección que haya tenido últimamente más éxito; la máquina de enseñar, "M. E.", enseña al paciente, quien, a su vez, aprende a "entrenar" a los animales; y el índice (I) que se lee en la esfera indicadora se debe a un circuito de coincidencia, pues la finalidad del juego es mantener juntos los dos caballos.

Unas reglas de enseñanza paskianas típicas alteran el juego del modo que sigue: cuando el índice obtenido aumenta, los caballos pastan más deprisa y disminuye el "heno" a disposición del paciente, y viceversa. En cuanto a la hierba, crece en el campo en forma constante, con independencia del "heno" que se haya depositado.

Un perfeccionamiento previsto estaría constituido por indicios (posiblemente unas luces en el interior de los botones de la caja de mando); otros serían: caminos más complicados, más caballos y una velocidad variable de crecimiento de la hierba.

El experimento piloto.—Veinticinco enfermos psiquiátricos de diagnosis variadas y veinticinco sujetos normales jugaron al *Juego de los caballos,* con objeto de averiguar si era un juego aceptable desde el punto de vista de la terapia ocupativa.

Resultados.—Todos los enfermos jugaron, la mayoría de ellos durante más de media hora; casi todos parecieron disfrutar, y algunos lo expresaron calurosamente; por ejemplo, uno dijo: "... es más que seductor. Estas lucecitas tienen algo que no te suelta." Los dos tercios estimaron el tiempo que habían estado jugando por debajo del tiempo realmente transcurrido.

La conclusión a que hemos llegado es que semejantes juegos, que podrían perfeccionarse considerablemente, son idóneos para enfermos psiquiátricos.

C. Indagaciones especiales

1) Pruebas de inteligencia

Las pruebas de elección múltiple, tales como las matrices progresivas de Raven, podrían programarse fácilmente en un aparato típico (máquina de enseñar) de Skinner. Se tiene una tarea serial, un mensaje de tipo 2 (P); como es sólo una prueba [*test*], no se dan al sujeto reglas apropiadas

(P, RA); no obstante lo cual, la estructura serial de la tarea enseña, como es claro para el sujeto si desdeña el orden de la serie (lo cual es posible en la presentación que se hace actualmente de la prueba, o sea, en un folleto).

2) Pruebas de personalidad

De un modo parecido podrían tratarse las pruebas de elección múltiple tales como el Minnessota Multiphasic Personality Inventory (MMPI). En este caso la tarea no es serial, y consiste en el mensaje 2 (P).

3) Una especulación: un nuevo tipo de información psicológica

Durante el experimento piloto del *Juego de los caballos* pudimos advertir ciertas pautas del modo de jugar, que podrían haberse visto confirmados si se hubiesen registrado los estados internos de la máquina de enseñar (datos que podrían tener un valor diagnóstico).

Dos enfermos esquizofrénicos con bloqueo del pensamiento desde el punto de vista clínico jugaron de una forma que acaso era eco de ello: su juego era errático, y la puntuación pasaba de buenísima a malísima de un modo abrupto.

Varios pacientes depresivos patentizaron cierta ansiedad inicial, pero luego, ayudados por la máquina de enseñar, llegaron a alcanzar una buena puntuación.

Es posible que la información [que se pueda obtener] de unas máquinas de enseñar perfeccionadas combine la sensibilidad de una entrevista de diagnosis con la objetividad de una prueba normalizada —idea que debe distinguirse de la manipulación por medio de computadoras de los datos normales del diagnóstico (véase, por ejemplo, un artículo de PAYCHA, 1960).

RECONOCIMIENTO

El doctor David Stafford-Clark, director de la York Clinic del Guy's Hospital, me ha permitido efectuar en ella el experimento piloto con el *Juego de los caballos*. Tengo que agradecer al señor Richard L. Gregory el haberme llamado la atención sobre la cola orientadora de los molinetes. La señorita N. D. Dickinson y sus colaboradores han escrito a máquina amablemente este trabajo.

RESUMEN

En esta comunicación se estudia la aplicación a la psiquiatría de las máquinas adaptativas, y, en particular, de las máquinas de enseñar (hemos construido y sometido a prueba una máquina de esta

índole, el *Juego de los caballos).* Definimos el aprender y el enseñar a base del análisis de los mecanismos de regimiento propuesto por ASHBY (1960), y describimos las máquinas de enseñar con referencia a un análisis de los mensajes que se cruzan entre el alumno, el profesor y la tarea. Representamos la psiquiatría como una serie de situaciones de enseñanza, y proponemos un criterio para la posibilidad de mecanización de estas situaciones: que la máquina de enseñar posea toda la variedad [de recursos] que se requiera (ASHBY, 1956) para habérselas con los mensajes procedentes del alumno.

Enumeramos luego las situaciones psiquiátricas que satisfacen esta condición, tales como la enseñanza [*education*], la terapia (inducción hipnótica y terapias del comportamiento y ocupativa) y ciertas indagaciones especiales (pruebas de inteligencia y de personalidad), sometiendo en cada caso a debate las máquinas de enseñar idóneas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASHBY, W. R. (1956): *An Introduction to Cybernetics.* Londres, Chapman and Hall [versión castellana, *Introducción a la cibernética,* Buenos Aires, Nueva Visión, 1960].

ASHBY, W. R. (1960): *Design for a Brain.* Londres, Chapman and Hall [versión castellana, *Proyecto para un cerebro,* Madrid, Tecnos, 1965].

BARTON, R. (1959): *Institutional Neurosis.* Bristol, John Wright and Sons.

CLARK, J. H. (1961): The induction of hypnosis. *Proc. 3rd. Intern. Congr. Ass. Cybernetics, Namur.* París, Gauthier-Villars.

CLARKE, A. M., y CLARKE, A. D. B. (1958): *Mental Deficiency: the Changing Outlook.* Londres, Methuen. (Cap. XIII).

CROWDER, N. A. (1962): *The Arithmetic of Computers.* Londres, English Universities Press.

EYSENCK, H. J. (1960): *Behaviour Therapy and the Neuroses.* Oxford, Pergamon Press.

HIVELY, W. (1960): An exploratory investigation of an apparatus for studying and teaching visual discrimination, using pre-school children. *Teaching Machines and Programmed Learning,* ed de A. A. LUMSDAINE y R. GLASER. Washington, National Education Association of the United States.

KEMENY, J. G.; SNELL, J. L., y THOMPSON, G. L. (1957): *Introduction to Finite Mathematics.* Nueva York, Prentice-Hall [versión cast.: *Introducción a la matemática finita,* Buenos Aires, Eudeba, 1965].

KREITMAN, N.; SAINSBURY, P.; MORRISSEY, J.; TOWERS, J., y SCRIVENER, J. (1961): The reliability of psychiatric assessment: An Analysis. *J. ment. Sci.,* 107, 887-908.

LUMSDAINE, A. A., y GLASER, R. (1960): *Teaching Machines and Programmed Learning.* Washington, National Education Association of the United States.

PASK, G. (1961): *An Approach to Cybernetics.* Londres, Hutchinson.

PAYCHA, F. (1960): Logique et technique du diagnostic médical. *Medical Electronics.* Londres, Iliffe and Sons.

SKINNER, B. F. (1960): Teaching machines. *Teaching Machines and Programmed Learning,* ed. de A. A. LUMSDAINE y R. GLASER, Washington, National Education Association of the United States.

WAILES, R. (1954): *The English Windmill.* Londres, Routledge and Kegan Paul.

La inestabilidad esencial de los sistemas con umbral y algunas posibles aplicaciones a la psiquiatría

Por W. R. ASHBY, H. VON FOERSTER y C. C. WALKER

INTRODUCCION

Desde hace medio siglo sabemos perfectamente lo difundidos que están los umbrales por el sistema nervioso y la importancia que tienen en los pormenores de la actividad neuronal; lo que, sin embargo, se sabe menos es en qué efectos a gran escala (en el comportamiento del organismo como un todo) se manifiesta el umbral. Se han efectuado dos estudios (BEURLE, 1956; FARLEY y CLARK, 1961) sobre el comportamiento de las ondas de actividad cuando se mueven por una red nerviosa, y ambos han hecho ver que semejante red tendría dificultades para mantener una *actividad* estacionaria [*steady*], ya que la onda de actividad tiende o bien a extinguirse completamente o a aumentar hasta la saturación; así pues, lejos de ser manejable y estacionaria, una retícula de esta índole ofrece, desde el punto de vista de la utilidad biológica, una inestabilidad esencial: no sólo tiende rápidamente hacia los extremos de la inactividad o de la actividad, sino que, una vez allí, únicamente puede apartársela con dificultad.

Este resultado merece que lo destaquemos, dado que es enteramente contrario a la plausible idea de que el umbral estabiliza las retículas. Y hace pensar, asimismo, que los cerebros reales y verdaderos tienen que llevar en sí algún mecanismo que se oponga activamente a la inestabilidad.

Los estudios citados son complejos, y no permiten relacionar de un modo directo y sencillo la inestabilidad y el umbral. Nosotros vamos a mostrar aquí que un modelo enormemente general y sencillo permite también hacer patente con claridad tal relación; y asimismo nos permite ver más fácilmente qué es lo esencial.

I. SUPUESTOS Y DEFINICIONES

Considérese una gran cantidad de unidades que reaccionen y que estén enlazadas, formando una retícula tan grande que no tengamos que tener en cuenta los efectos debidos a los bordes. Cada unidad reaccionadora se verá afectada por la llegada de pulsos (de alguna actividad física), y reac-

cionará a ellos emitiendo (o no) pulsos de la misma actividad física. En cualquier momento existirán pulsos de esta índole en varios puntos de la red, y si miramos el número real de ellos como fracción del número posible podremos hablar de su "densidad" en toda la red; e igualmente podremos hablar de la probabilidad de que en un punto determinado haya un pulso, con tal de que distingamos cuidadosamente los dos espacios de muestreo siguientes: 1) lugares diversos en un instante, y 2) momentos distintos de un lugar. En este trabajo nos concernerá especialmente cómo cambia la densidad con el tiempo.

Para ser precisos, supongamos que todas las unidades que reaccionan son idénticas, que cada una tiene n canales de entrada y que emite un pulso si y sólo si al menos θ de sus entradas reciben un pulso. Vamos a asumir que el tiempo avanza por pasos discretos, y que el estado del sistema en un instante depende en forma determinada de cuál haya sido el que tuviera en el instante precedente; razón por la cual supondremos que todos los pulsos llegan simultáneamente a todas las entradas, y que, tras transcurrir Δt, se producen en las salidas los pulsos que se deriven de aquéllos (que, por tanto, se convertirán en el conjunto siguiente de pulsos en las entradas).

Vamos a suponer que las entradas de las distintas unidades reaccionadoras reciben los pulsos independientemente, en el sentido de que la aparición de un pulso en una entrada no afectará a la probabilidad de aparición de pulsos en otra (suposición que implica que la red carece de bucles cortos, ya sean debidos a la convergencia de varias ramas alimentando una sola entrada o ya constituyan retornos de realimentación).

Cambios de la densidad con el tiempo

Supuesto que la retícula se encuentre ocupada con una densidad de pulsos d, podemos hallar ahora cuál será su densidad, d', un paso Δt más tarde.

Como estamos asumiendo que la densidad y la probabilidad pueden emplearse de modo intercambiable, la probabilidad, d_i, de que haya precisamente i entradas de una unidad reaccionadora determinada que reciban pulsos es:

$$d_i = \binom{n}{i} d^i (1 - d)^{n-i}. \tag{1}$$

En consecuencia, la probabilidad de que al menos θ entradas sean activas, esto es, de que la unidad se dispare, está dada por la función de probabilidad binomial acumulada (Ordnance Corps 1952):

$$d' = \sum_{i=\theta}^{n} \binom{n}{i} d^i (1 - d)^{n-i}. \tag{2}$$

Conviene advertir que d' está asimismo expresada por

$$d' = \frac{n!}{(\theta - 1)!\,(n - \theta)!} \int_0^d x^{\theta - 1} (1 - x)^{n - \theta}\, dx. \tag{3}$$

Estabilidad de la densidad

Estas ecuaciones, que dan el valor siguiente (d') de d en función del último que haya tenido (y de los parámetros n y θ), proporcionan, en realidad, una ecuación en diferencias [finitas]: lo mismo que d vale para obtener d', esta última nos dará d'', d'' nos permitirá pasar a d''', y así sucesivamente (de este modo podemos averiguar lo que sucederá a la densidad al transcurrir indefinidamente el tiempo); y, una vez resuelta, es preciso considerar d como una función del tiempo (que estará introducido en ella en lugar de la mera diferencia Δt).

La cuestión que ahora nos concierne es la de si el valor de d tenderá a quedarse en las proximidades de su valor inicial o si se lanzará hacia un extremo. Para responder a esta cuestión es preciso atender a dos preguntas distintas: en primer término, ¿existen densidades de equilibrio?, o sea, ¿existen densidades que, una vez alcanzadas, den lugar de entonces en adelante a las mismas, esto es, densidades para las que $d' = d$? (vamos a denotar con d^* tales densidades de equilibrio); y, segundo, ¿cómo varían las densidades *en las proximidades de* estas d^*? Si a una perturbación de d^* le sigue un retorno a este valor, el equilibrio es "estable"; y, expresándolo matemáticamente, existe equilibrio estable en d^* cuando

$$\frac{\partial d'}{\partial d} < 1, \tag{4}$$

supuesto que se dé a esta derivada el valor que tenga en d^*.

Podemos ver la manera en que d' dependa de d sin más que examinar la curva que represente su relación funcional (y las variaciones de los parámetros n y θ engendrarán una familia de tales curvas, cuyo estudio se facilita al máximo dejando de lado los casos extremos).

Consideremos primero la clase en la que θ tenga cualesquiera valores menos los dos extremos posibles, es decir, salvo 1 y n.

Diferenciando dos veces sucesivas la ecuación (3) con respecto a d puede verse fácilmente que $d'(d)$ tiene una pendiente nula tanto en $d = 0$ como en $d = 1$, y que presenta un único punto de inflexión, a saber, en $d = (\theta - 1)/(n - 1)$; mas, [por ello, y] puesto que $d' = 1$ en $d = 1$ y $d'(d)$ es continua dentro de los límites de integración, esta última función sólo puede cruzar la diagonal ($d' = d$) una sola vez: punto (que será uno de los valores de d^*) en que su pendiente tiene que exceder a la unidad, ya que empieza por debajo de la diagonal y acaba por encima de ella. Así pues, cuando $1 < \theta < n$, no hay ningún punto entre 0 y 1 que satis-

faga el criterio de estabilidad (4): la densidad sólo es estable en 0 y en 1.

En los extremos de θ, es decir, cuando θ es igual a 1 o a n, la retícula es degenerada, y podemos no ocuparnos de ella, por carecer de interés (su comportamiento no diferiría esencialmente del correspondiente al otro caso).

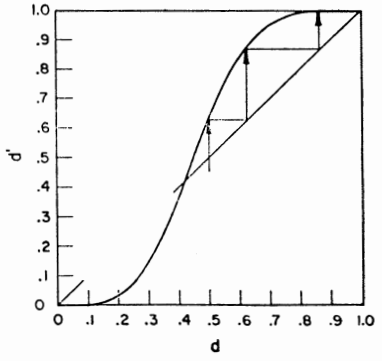


Fig. 1. Densidad en el paso siguiente (d') en función de la que haya tenido inmediatamente antes (d). (Umbral, 5; 10 entradas.)

La figura 1 representa la situación en el caso sencillo de que se tengan $n = 10$ y $\theta = 5$. Los equilibrios, d^*, son los puntos en que $d'(d)$ interseca a la diagonal: en 0, 0,42 y 1; los correspondientes a 0 y 1 son estables, y el de 0,42 es inestable, en el sentido de que a la más ligera perturbación de este valor le sigue un paso de la densidad a uno de sus valores extremos. En la figura 1 hemos indicado mediante un escalonamiento los cambios de densidad que se tendrían partiendo de un valor inicial de 0,5, y en la figura 2 pueden verse en qué forma provocarían diversas perturbaciones el escape hacia un valor extremo.

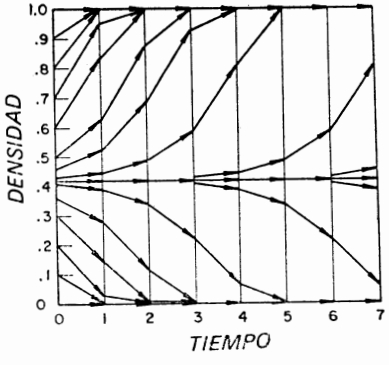


Fig. 2. Cambios de la densidad con el tiempo, a partir de varias densidades iniciales. (Umbral, 5; 10 entradas.)

¿Con qué rapidez diverge la densidad? La figura 2 (en la que el tiempo está graduado en pasos arbitrarios) muestra lo veloz que es la divergencia en el caso particular en que $n = 10$ y $\theta = 5$: las perturbaciones superiores al uno por ciento conducen, en menos de media docena de pasos, a una densidad que es prácticamente 0 o 1. Y no hay razones para creer que este ejemplo sea excepcional.

II. LA VARIABILIDAD DEL UMBRAL

El objeto principal de nuestro trabajo consiste en hacer ver que ciertos tipos de sistemas con umbral tienden a ser fuertemente inestables. Como no es imposible que el cerebro se valga de tales sistemas, y, con todo, no tiene una inestabilidad señalada, tiene interés echar una ojeada a la cuestión de si existe algún factor adicional sencillo que pudiera eliminar la inestabilidad.

Tendríamos una posibilidad obvia si el umbral no estuviese fijado, sino que fuese variable. Podemos hacer que cualquier densidad, d (con tal de que no sea exactamente ni 0 ni 1), dé lugar a una densidad subsiguiente d' (ya sea mayor o menor que d) sin más que tener un valor apropiado de θ; por lo tanto, si el umbral varía con la suficiente rapidez, la densidad de la retícula puede desplazarse en la dirección que queramos, con lo cual una realimentación de la densidad al umbral podría dar lugar a una retícula capaz de funcionar indefinidamente sin que d se quedase atrapada en 0 ni en 1. No habría dificultad en que la evolución y la selección natural aportasen semejante realimentación: tiene que haber muchas maneras de que el aumento de la densidad de pulsos conduzca, en virtud de un cambio de las condiciones físico-químicas, a una modificación del valor del umbral.

En esta comunicación estaría fuera de lugar una discusión de todos los pormenores específicos; pero nos gustaría, sin embargo, mirar por encima lo que sucedería si el mecanismo de realimentación aportado por la selección natural se estropease.

III. EL FALLO DE LA REALIMENTACION Y LA PSIQUIATRIA

Semejante realimentación tendría que estar regida genéticamente. ¿Qué ocurriría a la retícula que hemos considerado si la realimentación fuese distinta, esto es, si fuese mal hecha o funcionase mal en algún respecto? Es una cuestión que no carece de interés psiquiátrico.

Podemos advertir, primeramente, que si la red tiene alguna extensión,

habría que aplicar la realimentación correctiva en toda ella: como hacía ver la figura 2, bastan unos pocos pasos sin corregir para que la densidad pase a un valor extremo, y en caso de que las correcciones realimentaran la retícula de modo que hubiese grupos aislados [*patches*] de neuronas (u otros lugares dotados de umbral) a más de una o dos unidades del lugar en que se aplicase la acción correctiva, tales grupos serían inestables, y pasarían velozmente a los valores extremos. Supongamos ahora que, por la razón que fuese, algunos grupos no recibiesen la acción correctora; ¿qué sucedería?

Si el sistema en general fuese adaptativo, poca cosa. Los grupos no corregidos pasarían casi instantáneamente a los valores extremos, y entonces ocurriría una de dos cosas: en caso de que tales valores permaneciesen siendo extremos, llegarían a formar parte de las condiciones *constantes* a las que se adaptan las partes adaptativas, y la adaptación se produciría del modo usual (lo único que sucedería es que seguiría una ruta diferente); pero si los valores extremos no fuesen permanentes, sino condicionales, fluctuarían de acuerdo con las condiciones reinantes en torno suyo, y la densidad en cada uno de tales grupos alternaría, simplemente, entre dos valores (equivalentes a 0 y a 1); entonces la densidad del grupo se habría convertido, meramente, en una variable del sistema, y, una vez más, la adaptación no se vería impedida, en modo alguno, sino solamente obligada a seguir otro camino. En ambos casos, el fallo de la realimentación correctiva entrañaría únicamente que el grupo, en vez de tener una riqueza interna de posibilidades de variación, o bien la perdería completamente o la disminuiría hasta el punto de convertirse en meramente binario; y las características y capacidad del sistema total tenderían, simplemente, a reducirse a las de un sistema parcialmente más sencillo (en el que la reducción parcial sería aproximadamente proporcional al tamaño del grupo que hubiese fallado).

Esto suponiendo que los fallos se produjesen por grupos aislados. Pero en caso de fallos generales de la realimentación, ¿qué ocurriría? Un punto de interés es que en toda realimentación (en especial si su variación con el tiempo es continua) se forman fácilmente oscilaciones —empiezan los "pitidos"—, sobre todo si existe una demora apreciable en la transmisión de los efectos a lo largo del bucle. En caso de que se produjera tal oscilación, este ritmo se manifestaría en la densidad; ahora bien, los cambios tendrían que ocurrir con velocidad de un orden de magnitud (en el tiempo) inferior a la de los que diesen lugar a la densidad, ya que tienen que producirse muchos pulsos, a lo largo de un intervalo mucho mayor que el intervalo medio de los pulsos, para que la densidad pueda ser sentida como tal; de modo que sería de esperar que las oscilaciones de los pitidos se produjesen con un período mucho mayor que el de los pulsos.

Existe, como es claro, la posibilidad de que el ritmo de Berger * se deba a esta causa, si bien por el momento apenas podemos decir nada más.

Si la realimentación se vuelve inactiva en general, la totalidad del sistema pasará pronto o bien a una inactividad completa o a una actividad máxima (estados de los que saldrá sólo con grandes dificultades).

Si la densidad pasara a 0 y permaneciese allí, veríamos un sistema que permanecería inactivo mientras no se lo perturbase, que respondería sólo en grado mínimo cuando se lo sometiese a una perturbación y que volvería a una inactividad completa en cuanto ésta cesase: su comportamiento se parecería mucho al de un paciente melancólico. Por otra parte, si el sistema se encontrase en estado de excitación máxima, y se mantuviese allí por su propia inestabilidad, observaríamos un sistema constantemente activo, incluso cuando no le llegasen perturbaciones del exterior: sería activo porque estaría movido por su propia actividad, y su apariencia sería muy semejante a la de un paciente en estado de manía aguda. No cabe duda de que estas dos correspondencias entre la teoría dinámica y la observación clínica tienen interés, pero será necesario trabajar mucho más sobre la cuestión antes de que podamos llevar más adelante la correspondencia.

Queda por someter a consideración una última posibilidad. ¿En qué forma podrían afectar los fármacos y otros factores bioquímicos al sistema dotado de semejante inestabilidad corregida por un umbral variado mediante realimentación? Si el fármaco produjese simplemente un desplazamiento general y uniforme del umbral, a cualquier cambio inducido por él se opondrían inmediatamente unos cambios debidos a la realimentación que hemos supuesto correctiva; pero si, en lugar de afectar al umbral, debilitase la realimentación misma, el sistema se convertiría en uno en el que podrían producirse escapes localizados: se fraccionaría, en virtud de su propia dinámica, en un mosaico de densidades altas, bajas y medias; y es probable que el comportamiento de semejante sistema se caracterizase principalmente por su extravagancia. Actualmente se conocen diversos fármacos —los llamados ataráxicos— que se caracterizan por su capacidad para inducir comportamientos de un tipo enormemente mezclado; pero, una vez más, el que el mecanismo que hemos tenido en cuenta resulte o no pertinente para estas cuestiones es algo que habrá de elicitarse mediante estudios ulteriores.

RECONOCIMIENTO

Trabajo sufragado mediante el contrato NSFG 17414 de la National Science Foundation.

* Esto es, el ritmo de potencial eléctrico cerebral que se revela en los electroencefalogramas (del nombre del psiquiatra alemán que primero lo registró desde el exterior del cráneo). *(N. del T.)*

RESUMEN

Todo sistema grande que se valga de un umbral como medio de determinar si ha de producirse una transmisión en cada nodo es fundamentalmente inestable en cuanto a la densidad de puntos activos: cualquier incremento de ésta, al aumentar las probabilidades de que se transmitan efectivamente otros estímulos, tenderá a originar todavía mayores incrementos de densidad. Y el cálculo de los efectos exactos confirma lo que era de esperar.

Si el umbral estuviese fijado y las condiciones reinantes fuesen las que hemos supuesto, toda retícula dotada de un umbral tendría una actividad errática, que tendería constantemente a escaparse o bien a una inactividad completa o a una actividad máxima. Mas, puesto que no vemos normalmente que muchos procesos del sistema nervioso presenten tales escapes, tienen que existir algunos factores que se opongan a la inestabilidad primaria; hemos descrito uno sucintamente, haciendo ver que no hay dificultades para la estabilización de una retícula con umbral.

Hemos examinado brevemente la aplicación de estos hechos a diversos síntomas psiquiátricos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BEURLE, R. L. (1956): Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B, 240,* 55-94.

FARLEY, B. G., y CLARK, W. A. (1961): Activity in networks of neuron-like elements. *Proceedings of the Fourth Symposium on Information Theory,* ed. de C. CHERRY. Londres, Butterworth, Ltd.

ORDNANCE CORPS (1952): *Tables of the Cumulative Binomial Probabilities. ORDP 20-11.* Washington del D.C., Office of the Chief of Ordnance.

DISCUSION

WIENER.—Un sistema en el que fácilmente se puede producir inestabilidad es uno formado por alternadores: si se conecta un alternador de frecuencia muy distinta —o apreciablemente discrepante— o que tenga la fase mal, el sistema se destroza. ¿Cómo se trata este problema ingenieril de poner en fase un sistema que puede extenderse sobre toda una nación? Antiguamente se empleaban las facultades humanas: una persona miraba dos agujas que se movían representando la rotación provinente de distintos generadores (movidos por motores distintos), y cuando ambas tenían aproximada-

mente la misma velocidad se conectaba el aparato. Hoy todo esto se hace automáticamente: un mecanismo automático conecta el generador al circuito únicamente cuando su fase y su frecuencia son las apropiadas; el generador que todavía no tiene carga pasa por distintas fases, y cuando llega a la debida se lo mete dentro; y si, por cualquier catástrofe, un generador experimenta una sobrecarga, salta automáticamente un cortacircuitos y el generador se encuentra de nuevo girando en vacío. Dicho de otro modo, en los sistemas de un tipo tal que las inestabilidades no sólo son posibles, sino muy probables, se las limita mediante unos aparatos fuertemente no lineales, que abren o cierran un circuito en el momento debido. Y, manteniéndose en una gama [de variaciones] más reducida, existe asimismo la tendencia de los generadores (que tiene la máxima importancia) a empujarse mutuamente hacia la frecuencia. Cuando se estudie el sistema nervioso será sumamente útil examinar las analogías de este género que haya en complejos de máquinas parecidos y (operativamente) mucho más pequeños.

Otra cuestión que me interesa mucho es la del estadio único y de los cambios a gran escala que se logran por la actuación del sistema. Estoy ahora trabajando en esto en ciertos campos de la mecánica estadística: me parece que es posible idear una teoría estadística del sistema para que los cambios pequeños de éste sean una transformación infinitesimal (esto es lo que estoy haciendo, bajo ciertas circunstancias, en unos trabajos de mecánica estadística); y espero demostrar que si estos pequeños cambios no alteran las probabilidades y el sistema está en equilibrio, lo mismo pasará con los cambios de importancia. Dicho de otra forma: me parece que los métodos estadísticos y los que se valen de la integración en un espacio funcional son unos instrumentos muy poderosos con los que contamos para esta labor.

COWAN.—Tengo que confesar que soy bastante escéptico sobre ese modo de ataque. Para estabilizar la salida de los sistemas se utiliza el ruido, pero entonces se tiene el problema de dominar éste y de garantizar que la salida no sea una función aleatoria de la entrada. Supongamos que no hay ruido: entonces, si para un elemento el resultado consiste en lo que VON NEUMANN llamaba restauración, se tiene un resultado trivial; y si no nos ocupamos de un [solo] elemento con umbral lineal, según parece ocurrir en una retícula, tampoco es muy interesante, pues las funciones clásicas que pueden obtenerse a partir de tal retícula son triviales: sólo pueden sacarse un poco más de 2^n funciones de las 2^{2^n} que generalmente se manejan en las redes neurales.

Hasta ahora sólo he tenido en cuenta sistemas en los que se tiene una excitación y lo que llamamos elementos con umbral lineal. Aun

cuando no me atrevo mucho a dar el salto de las redes neurales al sistema nervioso, hay pruebas bastante aceptables de que en éste hay muchas inhibiciones, incluso al nivel de la unidad aislada; hay una cantidad enorme de interacciones entre aferentes en el sistema nervioso, lo cual proporciona un conjunto de mucha mayor riqueza que manejar: en realidad, un sistema así puede tener un comportamiento funcional cualquiera. No parece que el sistema nervioso tenga aquel tipo de elementos lineales sencillos, sino que, en realidad, tiene una enorme colección de tipos distintos de elementos: unos monótonos y otros antimonótonos, y todos con ruido.

ROSS ASHBY.—Nosotros no hemos tenido en cuenta el efecto de las influencias inhibidoras.

WIENER.—Me parece que uno de los problemas de más trascendencia es el de que el sistema nervioso no trabaja en las proximidades del nivel de actividad nula. Es preciso contar con fluctuaciones alrededor de la actividad aleatoria, lo cual quiere decir que no se puede despreciar la actividad de fondo.

ROSS ASHBY.—Una cosa que me gustaría destacar es que, para que los pulsos no sean enormemente ineficaces como portadores de información, su distribución y sus llegadas tienen que ser en gran medida estadísticamente independientes. Pero la independencia de las llegadas engendra una distribución binomial en los números que lleguen en un instante dado, y es la forma binomial, con una joroba en medio, y no con un hoyo, lo que da origen a la inestabilidad. De modo que en el caso que estamos considerando hay un conflicto fundamental entre la necesidad de eficiencia como canal de comunicación y la de estabilidad.

COWAN.—Naturalmente, lo que a uno le interesan no son entradas portadoras de independencia, sino de configuraciones.

ROSS ASHBY.—Para que el sistema nervioso sea eficiente tiene que volver a codificar las configuraciones, desembarazándose de la redundancia que lleve cada una, hasta apretujar la información dentro de una forma más eficiente, que tiene que ser una en la que las variables varíen independientemente.

WIENER.—No veo que haya ninguna necesidad de suponer que el sistema nervioso trabaje en las proximidades de la máxima eficacia como portador de información: es probable que se derroche terriblemente sólo para que funcione. Me parece que esa suposición, la de que el sistema nervioso está dirigido por la máxima eficacia como portador de información, está equivocada de medio a medio.

ROSS ASHBY.—No puedo estar de acuerdo con usted, a menos que estemos hablando de cosas distintas. No estoy suponiendo, ni creo, que el sistema nervioso trabaje con la eficacia que consiguen

los ingenieros de las telecomunicaciones: me refería a "eficacia" sólo en el sentido de evitar las redundancias más crasas.

WIENER.—¿Qué razones tiene para creer que no hay una redundancia muy grande?

ROSS AHSBY.—En tal caso sería sumamente eficaz: sería un portador al máximo de su capacidad.

COWAN.—Lo malo del análisis informatorio del sistema nervioso es el canal de comunicación, pues desprecia completamente lo verdaderamente básico, el aspecto de realización ingenieril de la función de coste. Si miramos el sistema nervioso como un canal de comunicación que suministra energía al sistema, puede resultar que lo que desde el punto de vista informativo sea algo que esté bien hacerlo, esté malísimamente hacerlo, en realidad: la consideración importante es la energética, y no la informatoria.

ROSS ASHBY.—Estoy de acuerdo en que las dos tienen importancia. Cuando un conejo, por ejemplo, tiene que correr para salvar la vida, es posible que el peso de un gramo suplementario de cerebro sea una desventaja considerable; y si la especie llega a formar unos cerebros con un gramo adicional de sustancia, ese gramo tiene que proporcionar, al menos, una ventaja que lo compense en mejor coordinación muscular, en capacidad de maniobra, en aprender cuál es el estilo del depredador, etc. Como el peso por sí sólo es una desventaja, la selección natural empujará incesantemente a evitar las ineficiencias groseras en la sistematización de la información.

WIENER.—Lo de que tengamos que encontrarnos cercanos a la eficacia máxima informativamente es más o menos un argumento teleológico: podremos estar cerca del máximo de lo que podamos hacer en cuanto tarea ingenieril, y es probable que lo estemos, pero eso implica que aprovechemos la información hasta la última pizca *(bitio).*

Teoría matemática de los efectos de la estructura celular y de los procesos de la difusión en la homeóstasis y la cinética del sistema endocrino, con referencia especial a ciertas psicosis periódicas

Por N. RASHEVSKI

En una serie de importantes estudios, DANZIGER y ELMERGREEN (1954, 1956, 1957 y 1958) han desarrollado una teoría de las interacciones no lineales en el sistema endocrino, tratando, en particular, la interacción entre la pituitaria y la tiroides; y han aplicado estos estudios a la catatonía periódica, suponiendo que el carácter periódico de esta enfermedad reflejaba las oscilaciones de relajación periódicas del sistema endocrino. Esta teoría ha resultado tener valor predictivo en la clínica (DANZIGER y ELMERGREEN, 1958).

Los hallazgos de GJESSING (1939 y 1953) apuntan vigosoramente hacia la idea de que la catatonía periódica tiene alguna relación con las fluctuaciones periódicas del sistema endocrino, especialmente en la glándula tiroides: pues aquel autor observó que en esta enfermedad se producen cambios rítmicos del metabolismo basal; y, sobre ello, que la administración de la hormona tiroidea detiene la periodicidad, y que se la puede emplear como medio terapéutico contra la catatonía periódica.

El que el mal funcionamiento del sistema endocrino se refleje fácilmente en un mal funcionamiento del sistema nervioso central no puede sorprendernos: aun cuando no conocemos todavía el mecanismo real de los efectos de las secreciones internas sobre este sistema, el hecho de que diversos desequilibrios endocrinos ejerzan un efecto sobre los fenómenos mentales está perfectamente asentado. Por lo tanto, es muy tentadora la idea de poner en relación los cambios periódicos del estado mental de un paciente con los posibles cambios periódicos de su sistema endocrino.

En los sistemas físicos pueden acontecer fluctuaciones periódicas de una variable siempre que su comportamiento esté representado por una ecuación diferencial de segundo orden (o superior). Tenemos una ecuación de este tipo lo más sencilla posible con

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -ax$$

siendo a una constante. En este caso, la variación de x con respecto al tiempo es una oscilación permanente y no amortiguada.

Cuando nos ocupamos de sistemas químicos o bioquímicos, las variaciones de las cantidades —o de las concentraciones— de las distintas sustancias que allí entren están siempre representadas por ecuaciones diferenciales de primer orden. Una ecuación diferencial de primer orden *aislada,* ya sea lineal o no, no da origen a soluciones periódicas, excepto en casos especialísimos y físicamente implausibles; sin embargo, un sistema de *dos o más* ecuaciones de este tipo puede llevar a soluciones periódicas, puesto que, como se sabe, cualquier sistema de n ecuaciones diferenciales de primer orden es matemáticamente equivalente a una ecuación diferencial de n-ésimo orden.

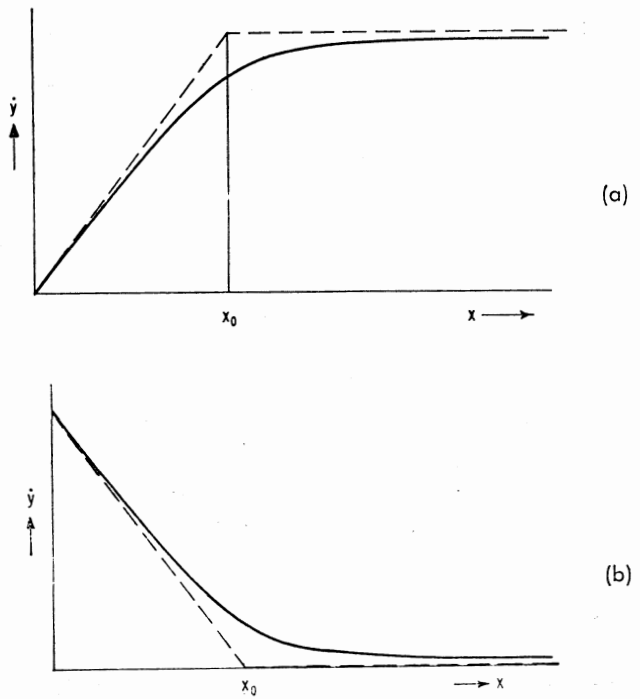
Así pues, si atendemos a la secreción, producción o destrucción de una sola sustancia, no podemos esperar que haya periodicidades algunas en tal fenómeno; pero si nos fijamos en la interacción de varias sustancias, que estará representada por un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, tal interacción puede conducirnos a ciertas periodicidades.

No obstante lo cual, encontramos en seguida una situación decepcionante: si el sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden es lineal, aun en caso de que aparezcan soluciones periódicas, éstas son, en general, amortiguadas, ya sea positiva o negativamente. Un amortiguamiento positivo significa que las periodicidades no son permanentes, y que el sistema acaba por llegar a un estado de equilibrio, en el que las variables son independientes del tiempo; y uno negativo quiere decir que la amplitud de las variables oscilantes aumenta con el tiempo, hasta el infinito (lo cual equivale a que el sistema no puede existir). Es cierto que cabe encontrar relaciones entre los coeficientes del sistema que, si se satisfacen, garantizan que el amortiguamiento es cero y, por consiguiente, que las oscilaciones son permanentes; pero estas relaciones están representadas por *igualdades* entre ciertas combinaciones de coeficientes (RASHEVSKI, 1960), y los coeficientes en cuestión representan ciertos parámetros físicos, químicos o biológicos; por lo tanto, para garantizar unas oscilaciones permanentes, tales parámetros tienen que satisfacer exactamente ciertas igualdades; ahora bien, la probabilidad de que dos parámetros físicos, químicos o biológicos sean *exactamente* iguales es infinitesimal, y si, por el contrario, las igualdades no *se satisfacen exactamente,* existe siempre un amortiguamiento, ya sea positivo o negativo.

La situación es distinta cuando el sistema de ecuaciones diferenciales no es lineal: en algunos casos se tienen soluciones periódicas con independencia de los valores de las variables, y en otros las condiciones para que las oscilaciones sean permanentes están representadas por *desigualdades* (y si una desigualdad es posible físicamente, en absoluto, la probabilidad de su aparición es finita).

Cualquier sistema de ecuaciones diferenciales puede ser considerado como *aproximadamente lineal* dentro de una gama suficientemente estrecha de valores de las variables. Por consiguiente, cuando nos interesan las condiciones de equilibrio (o unas condiciones muy próximas a él), puede bastar un sistema de ecuaciones lineales para describir la situación de cualquier sistema físico-químico o biológico, en particular, del sistema endocrino (ROSTON, 1959); y siempre que nos ocupemos de unos márgenes de variación grandes de varios parámetros biológicos, así como siempre que tales variaciones ostenten periodicidades permanentes, es esencial la introducción de una falta de linealidad (RAPOPORT, 1952).

En las figuras 1a y 1b hemos representado, con línea continua, un tipo de no linealidad que es biológicamente plausible y tiene matemáticamente cierto interés práctico. El efecto que una sustancia, x, produzca



Figs. 1a y 1b. Representación del efecto que la sustancia x puede tener sobre la velocidad de reacción, $\dot{y}$, de otra, y: (a) $\dot{y}$ aumenta con x; (b) $\dot{y}$ disminuye. Líneas de trazos: aproximación lineal a las curvas.

sobre la velocidad de reacción, $\dot{y}$, de otra sustancia, y, puede ser análogo al representado en dichas figuras: se tratará de un efecto pronunciado para valores pequeños de x, pero tal que para valores grandes de esta

sustancia la cantidad $\dot{y}$ se vuelva independiente de x. (En la fig. 1a, la velocidad $\dot{y}$ aumenta con x, y en la 1b disminuye.)

Podemos representar con suficiente aproximación las curvas de las figuras 1a y 1b mediante las líneas de trazos: y con esta aproximación podemos decir que $\dot{y}$ varía linealmente con x en el intervalo $0 < x < x_0$, y que es independiente de x para $x > x_0$; mas una independencia es también una relación lineal, en la que el coeficiente de proporcionalidad es igual a cero, de modo que, desde un punto de vista matemático, el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales se descompone en dos sistemas de ecuaciones lineales, uno válido en el intervalo $0 < x < x_0$, y en el segundo en el $x > x_0$ (los dos sistemas tienen la misma forma, pero algunos de los coeficientes son distintos). Podemos fijar ahora las desigualdades que conducirán a un amortiguamiento negativo para $x \leq x_0$, y las que llevarán a uno positivo para $x \geq x_0$; y en este caso habrá un valor de x que representará la amplitud de las oscilaciones no amortiguadas. (La existencia de tal valor no depende de la aproximación que puede verse en las figuras 1a y 1b, puesto que tomando x suficientemente pequeño, por un lado, y por otro suficientemente grande, la situación verdadera estará representada por una aproximación lineal con el grado de exactitud que queramos.)

En su primer trabajo, DANZIGER y ELMERGREEN (1954) consideraron, como primera aproximación, sólo el sistema tiroides-pituitaria (lo cual era, desde luego, una simplificación excesiva, exactamente lo mismo que lo es la consideración del problema de los dos cuerpos en la mecánica celeste). Se sabe que la hormona tiroidea inhibe la formación de la tirotrópica: un aumento de la concentación de aquella hormona reduce la velocidad de formación de esta otra; DANZIGER y ELMERGREEN suponen que el efecto inhibidor sigue una curva parecida a la indicada en la figura 1b, y emplean luego la aproximación lineal que puede verse en la línea de trazos de la misma figura. Supongamos que c y h denoten dos constantes; definen entonces la función $F(\theta)$ del modo que sigue:

$$\begin{aligned} F(\theta) &= c - h\theta \quad \text{para } \theta < c/h \\ F(\theta) &= 0 \quad \text{para } \theta \geq c/h. \end{aligned} \tag{1}$$

Denotemos ahora con p la concentración de tirotropina en el sistema, con θ la de tiroidina, con a y b otras constantes y con R la rapidez de introducción de tiroidina exógena. Entonces, las ecuaciones que representan el contenido de la teoría son:

$$\frac{dp}{dt} = F(\theta) - gp \tag{2}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = ap - b\theta + R \tag{3}$$

(La función $F(\theta)$ introduce en el sistema (2)-(3) una falta de linealidad.) Valiéndose del método de las isoclinas, los autores hacen ver fácilmente que para $R = 0$ este sistema puede presentar solamente oscilaciones amortiguadas de p y θ alrededor de los valores de equilibrio *, de modo que no es posible que se tengan unas periodicidades continuadas y sin amortiguar, tales como las que se observan en la catatonía periódica (atribuyen éstas a algún mal funcionamiento del sistema, dejando indefinida la naturaleza de tal disfunción). Sin embargo, las ecuaciones (2) y (3) permiten ver que introduciendo tiroidina exógena en cantidad suficiente se puede parar el conjunto del mecanismo: pues si R es suficientemente grande, y teniendo en cuenta (1) y (2), puede hacerse que dp/dt se convierta en cero (y, por consiguiente, también p); entonces, $d\theta/dt$ se vuelve asimismo cero, y el nivel de θ se convierte en $\theta = R/b$, que está determinado únimente por la tiroidina administrada exógenamente. Así pues, cualquiera que sea el mecanismo del mal funcionamiento que origine las oscilaciones no amortiguadas, tan pronto como se hace que todo el sistema se convierta en inoperante mediante una R suficientemente grande, dicho mecanismo queda eliminado: lo cual constituye una interpretación de las observaciones de GJESSING (1939) según las cuales podían eliminarse los síntomas de la catatonía periódica manteniendo al paciente en forma continua bajo una administración apropiada de tiroidina.

En su última teoría (DANZIGER y ELMERGREEN, 1958), los autores emplean un modelo más realista, en el que la tirotropina activa la formación de un enzima intermedio, E, que, a su vez, activa catalíticamente la formación de θ. Las ecuaciones básicas son ahora:

$$\frac{dp}{dt} = F(\theta) - gp \tag{4}$$

$$\frac{dE}{dt} = mp - kE \tag{5}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = aE - b\theta + R \tag{6}$$

* En realidad, en su primer trabajo DANZIGER y ELMERGREEN (1954) empleaban un conjunto de ecuaciones distinto del (2)-(3), a saber, el siguiente:

$$\frac{dp}{dt} = c - \frac{k_1 m_1 \theta}{1 + m_1\theta} - gp \tag{2a}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{k_2 m_2 p}{1 + m_2 p} - b\theta \tag{3a}$$

Puede demostrarse que, en lo que respecta a las periodicidades, las propiedades de este sistema de ecuaciones son las mismas que las del (2)-(3); y también puede emplearse para este último sistema el método de las isoclinas, utilizado por los autores con el sistema (2a)-(3a). De este último puede obtenerse el (2)-(3) sustituyendo $k_1 m_1 \theta/(1 + m_1\theta)$ por la aproximación constituida por dos segmentos de recta y haciendo m_2 suficientemente pequeño.

Se ha demostrado, tanto por un método analítico aproximado como usando una computadora, que dentro de un margen definido de las constantes *a, b, c, g, h, k* y *m,* el sistema (4)-(6) representa unas oscilaciones no amortiguadas, de modo que la aparición de las periodicidades está ahora vinculada definitivamente a cambios sufridos por las constantes arriba mencionadas. Las conclusiones extraídas del sistema (3)-(4), siguen siendo válidas, pero podemos sacar otra importante conclusión más. En general, la administración de tiroidina exógena va unida al peligro de pasarse temporalmente del nivel de seguridad de θ; si se proporciona un fármaco que inhiba la formación de E (dicho de otro modo, que reduzca la constante m), el nivel de θ bajará; y si tal fármaco se administra previamente a la tiroidina, podrán darse sin peligro unas dosis de ésta mucho mayores. Se ha estimado que un bocígeno *, por ejemplo, propiltiuracil, podría actuar como inhibidor de la formación de θ; y los resultados esperados se han visto verificados clínicamente.

Debe advertirse, sin embargo, que las mismas conclusiones podrían haberse obtenido a partir de las ecuaciones (2) y (3), sin más que suponer que el bocígeno reduce el coeficiente a de la ecuación (3).

Si bien la teoría ha probado ser útil clínicamente, está sujeta a graves objeciones por razones teóricas. Tanto el sistema (2)-(3) como el (4)-(6) representan una cadena de reacciones de un sistema homogéneo, mientras que, en realidad, el sistema es sumamente heterogéneo: la formación de los distintos componentes, tales como p, θ y E, se produce en lugares distintos, y la corriente sanguínea los transporta de un lugar a otro; cosa que puede cambiar la forma de la ecuación y afectar a las conclusiones. Estudiemos primero lo que ocurre en el caso más sencillo, representado por el sistema (2)-(3).

La hormona tirotrópica se produce por las células de la glándula pituitaria. En beneficio de la sencillez, consideremos N_p de tales células, rodeada cada una de ellas por la corriente de la sangre (imagen excesivamente simplificada, pero que puede justificarse como primer paso).

En realidad, no solamente tendríamos que considerar el interior de la célula y la sangre, sino asimismo el fluido intercelular; ahora bien, el mismo razonamiento que vamos a utilizar más abajo sería aplicable en este caso más general, y conduciría a unas expresiones más complicadas, pero las conclusiones básicas, que hemos de debatir al final de este trabajo, seguirían siendo las mismas. Cosa muy parecida ocurre con las células de la glándula tiroides, cuyo número denotaremos con N_θ. Y vamos a admitir que la corriente sanguínea tenga un volumen constante, V_s.

De un modo enteramente general, para la concentración media, $\bar{c}$, de una sustancia cualquiera que se produzca o consuma en una célula a una

* Que estimula el bocio, esto es, el desarrollo de la glándula tiroides. *(N. del T.)*

cuota de q por unidad de volumen y que se encuentre en el medio circundante en una concentración $\bar{c}_o$, tenemos (RASHEVSKI, 1960):

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = q - \frac{\bar{c} - c_o}{\Lambda} \tag{7}$$

siendo Λ una función del tamaño y la forma de la célula, así como de su permeabilidad para tal sustancia y del coeficiente de difusión de ésta dentro y fuera de la célula. Cuando, como sucede en la corriente sanguínea, se produce una agitación considerable, podemos suponer que el coeficiente de difusión en el exterior es infinito. Hacemos observar que, para tamaños finitos de la célula, $\Lambda = 0$ si y sólo si ambos coeficientes de difusión y la permeabilidad son infinitos; y como estamos admitiendo ya que el coeficiente de difusión externo es infinito, tendremos:

$$\Lambda = 0. \equiv . h = \infty \tag{8}$$

Antes de seguir adelante hemos de especificar de un modo más definido el mecanismo de acción de la tirotropina sobre la formación de la tiroidina, y el de la hormona tiroidea sobre la de aquélla. Si suponemos que este mecanismo es puramente catalítico, de modo que la hormona tiroidea no se consuma en la célula de la glándula pituitaria al afectar a la formación de la tirotropina, la concentración de la hormona tiroidea en el interior de las células de esta glándula, θ_p, será la misma que la que tenga en la sangre; y denotando esta última concentración con θ_s, tendremos:

$$\theta_p = \theta_s \tag{9}$$

Análogamente, si la tirotropina actúa solamente como catalizador en la formación de la hormona tiroidea, la concentración de aquélla dentro de las células de la glándula tiroides, p_θ, será la misma que su concentración en la sangre, p_s; luego:

$$p_\theta = p_s \tag{10}$$

Si, por el contrario, la formación de la hormona tiroidea involucra alguna reacción que consuma tirotropina, o si la inhibición de ésta entraña una reacción que consuma tiroidina, las ecuaciones (9) y (10) no serán válidas; lo cual, como vamos a ver ahora, redundaría en un aumento del número de variables y del de ecuaciones. Para simplificar, supondremos que las reacciones que hemos descrito arriba son puramente catalíticas.

Tenemos entonces cuatro variables: la concentración de tirotropina dentro de las células de la glándula pituitaria, $\bar{p}$; la de la hormona tiroidea en el interior de las células de la glándula tiroidea, $\bar{\theta}$, y las concentraciones respectivas en la sangre p_s y θ_s. En cuanto a la cuota de producción de $\bar{p}$, tenemos ahora, en virtud de (9) y (2), la expresión:

$$q_p = F(\theta_s) - g\bar{p} \tag{11}$$

Luego denotando con Λ_p el valor de Λ para p, tenemos, a partir de (7):

$$\frac{d\bar{p}}{dt} = F(\theta_s) - g\bar{p} - \frac{\bar{p} - p_s}{\Lambda_p} \tag{12}$$

El último término del segundo miembro de (12) representa el flujo medio de salida de tirotropina por unidad de volumen de célula secretora; y si V_p denota el volumen de cada una de éstas, el flujo total de salida a la corriente sanguínea será igual a:

$$\frac{N_p V_p (\bar{p} - p_s)}{\Lambda_p} \tag{13}$$

En tanto que en esta corriente la tiroidina y la tirotropina no entran en interacción, su destrucción se produce a las cuotas respectivas $-gp_s$ y $-b\theta_s$ por unidad de volumen; por consiguiente, la cuota total de destrucción de p_s será igual a $-V_s g p_s$. Y, por otra parte, la expresión (13) representa la entrada total de tirotropina en la sangre; luego la cuota de cambio de la totalidad de tirotropina de la sangre será:

$$V_s \frac{dp_s}{dt} = \frac{N_p V_p (\bar{p} - p_s)}{\Lambda_p} - V_s g p_s \tag{14}$$

o bien:

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{N_p V_p}{V_s \Lambda_p} \bar{p} - \frac{N_p V_p + V_s \Lambda_p g}{V_s \Lambda_p} p_s \tag{15}$$

Mediante un razonamiento análogo extraemos de la ecuación (13):

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = a p_s - b\bar{\theta} + R - \frac{\bar{\theta} - \theta_s}{\Lambda_\theta} \tag{16}$$

y para $d\theta_s/dt$ tenemos:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{N_\theta V_\theta}{V_\theta \Lambda_\theta} \bar{\theta} - \frac{N_\theta V_\theta + V_s b}{V_s \Lambda_\theta} \theta_s \tag{17}$$

Hagamos:

$$A = g + \frac{1}{\Lambda_p};\ B = \frac{N_p V_p}{V_s \Lambda_p};\ C = \frac{N_p V_p + V_s \Lambda_p g}{V_s \Lambda_p}$$
$$D = b + \frac{1}{\Lambda_\theta};\ G = \frac{N_\theta V_\theta}{V_s \Lambda_\theta};\ H = \frac{N_\theta V_\theta + V_s b}{V_s \Lambda_\theta} \tag{18}$$

Entonces las ecuaciones (12), (15), (16) y (17) pueden escribirse del siguiente modo:

$$\frac{d\bar{p}}{dt} = F(\theta_s) - A\bar{p} + \frac{p_s}{\Lambda_p} \tag{19}$$

$$\frac{dp_s}{dt} = B\bar{p} - Cp_s \tag{20}$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = ap_s - D\bar{\theta} + \frac{\theta_s}{\Lambda_\theta} + R \tag{21}$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = G\bar{\theta} - H_{\theta_s} \tag{22}$$

En lugar de dos ecuaciones tenemos ahora cuatro, y debido a $F(\theta_s)$ el sistema no es lineal. Si suponemos que los efectos de la tirotropina sobre la hormona tiroidea (y viceversa) no son catalíticos, las ecuaciones (9) y (10) no serán válidas; entonces tendremos seis variables, $\bar{\theta}$, θ_s, θ_p, $\bar{p}$, p_s y p_θ así como dos ecuaciones suplementarias, que dependerán de las suposiciones que hagamos acerca de las cuotas de consumo de tirotropina en la glándula tiroides y de hormona tiroidea en la glándula pituitaria.

Hemos llegado al sistema (19)-(22) conservando todos los supuestos básicos de DANZIGER y ELMERGREEN, pero introduciendo el efecto de la heterogeneidad, que no puede despreciarse.

Por un método igual al de estos autores (DANZIGER y ELMERGREEN, 1957) puede demostrarse que cuando se satisfacen ciertas desigualdades entre las cantidades A, B, C, D, G y H de las expresiones (18), el sistema (19)-(22) tiene soluciones periódicas no amortiguadas (ELMERGREEN, comunicación personal); en otro lugar expondremos los detalles de este resultado.

En el caso del sistema (4)-(6) podemos admitir, para simplificar, que E se produce en las células de la glándula tiroides y que *no* se difunde hacia fuera; y supondremos de nuevo que el efecto de la tirotropina sobre la formación de E sea puramente catalítico. En tal caso obtenemos el sistema de ecuaciones que sigue:

$$\frac{d\bar{p}}{dt} = F(\theta) - A\bar{p} + \frac{p_s}{\Lambda_s} \tag{23}$$

$$\frac{dp_s}{dt} = B\bar{p} - Cp_s \tag{24}$$

$$\frac{dE}{dt} = mp_s - kE \tag{25}$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = aE - D\bar{\theta} + \frac{\theta}{\Lambda_\theta} + R \tag{26}$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = G\bar{\theta} - H_{\theta_s} \tag{27}$$

Una vez más puede demostrarse que cuando los parámetros se conservan dentro de ciertos márgenes, el sistema (23)-(27) tiene soluciones periódicas no amortiguadas.

Las conclusiones que hemos extraído del sistema (2)-(3) con respecto a los efectos de la administración de hormona tiroidea siguen siendo válidos para la situación descrita por el sistema (23)-(27); y, análogamente, continúan siendo válidas en esta última situación las conclusiones sacadas del sistema (4)-(6), referentes al efecto producido cuando se dan un bocígeno y hormona tiroidea; pues el efecto de administrar tiroidina se debe a la aparición de la función $F(\theta_s)$ en (19) y en (23): una entrada exógena suficientemente grande de la hormona tiroidea aumentará θ_s hasta el valor c/h, lo cual, de acuerdo con (1), inhibirá completamente la formación de tirotropina, hecho que, a su vez, detendrá la formación de θ y de E.

No deja de tener interés que ahora, al tener en cuenta el tamaño, forma y constantes físicas de las células, vemos que pueden presentarse oscilaciones permanentes incluso en el sistema de dos componentes tiroides-pituitaria: ya no es necesario introducir el enzima intermedio, E, por lo que *se refiere a la existencia de periodicidades permanentes:* y el efecto de administrar un bocígeno para impedir un "pasarse en la tiroidina" tiene que interpretarse ahora como indicación de que este fármaco reduce el coeficiente a de (21).

De los resultados anteriores cabe extraer una importante conclusión biológica, que puede tener trascendencia clínica. Los sistemas (19)-(22) y (23)-(27) poseen soluciones periódicas no amortiguadas cuando los parámetros se conservan dentro de ciertos márgenes; según (18), los valores de los parámetros A, B, C, D, G y H dependen de Λ_p y Λ_θ pero estos últimos, a su vez, aparecen directamente como parámetros del sistema. Ahora bien, Λ_p es función del *tamaño y la forma* de las células de la glándula pituitaria que segregan la tirotropina, y asimismo función del coeficiente de difusión de esta hormona en esas mismas células, D_p, y de la permeabilidad de las membranas celulares para la tirotropina, h_p; y, análogamente, Λ_θ es función del tamaño y forma de las células de la glándula tiroides que producen la hormona tiroidea, así como, además, del coeficiente de difusión de esta hormona en tales células, D_θ, y de la permeabilidad de las mismas células para esta hormona, h_θ.

Si el comienzo de las oscilaciones de relajación no amortiguadas se produce en virtud de cambios experimentados por alguno de los parámetros de los sistemas (19)-(22) y (23)-(27), estos cambios pueden deberse, bien a modificaciones del *tamaño* o *forma* de las células secretoras de las hormonas o a un *cambio de las propiedades físicas* de estas mismas células que puedan afectar a D_p, h_p, D_θ y h_θ: un aumento de su contenido de agua, por ejemplo, puede dar lugar a un incremento de tamaño, y modificar también los D y las h; un trauma mecánico, o un tumor, pueden ori-

ginar una modificación de la forma de las células, y los factores que afecten a la viscosidad del citoplasma afectarán a los D y a las h.

Si mediante un estudio de los sistemas (19)-(22) y (23)-(27) se fijan los márgenes de variación de los parámetros o de sus combinaciones para los que aparecerán (o no aparecerán) soluciones oscilatorias no amortiguadas, de este modo se pasará de las expresiones conocidas de las Λ a un conjunto de ecuaciones algebraicas, en el que se hará patente qué modificaciones de tamaño y forma de las células y de los valores de los D y las h pueden colocar los sistemas citados en estado oscilatorio. E, inversamente, tales ecuaciones indicarán qué modificaciones de la estructura de las células han de producirse en virtud de unas medidas terapéuticas apropiadas para estabilizar el sistema.

La terapia tiroidea de la catatonía periódica se basa en la eliminación de un mecanismo defectuoso y en proporcionar al paciente continuamente, tras tal eliminación, tiroidina exógena. Mas la discusión que acabamos de llevar a cabo señala una ruta de investigación que podría conducir, en último término, a una *curación* efectiva de la enfermedad, al restaurar en el organismo las condiciones normales.

En cualquier caso, las consideraciones anteriores sugieren la conveniencia de un estudio histológico de las glándulas pituitaria y tiroides en los enfermos con catatonía periódica (sugerencia, desde luego, más fácil de hacer que de llevar a efecto).

Es preciso que, como conclusión, mencionemos un punto importantísimo. Los sistemas (19)-(22) y (23)-(27) se basan en el supuesto de que el transporte de los componentes se efectúa mediante difusión libre; pero la secreción de hormonas involucra, de un modo más que probable, fenómenos de transporte activo, cuya introducción complicaría todavía más las ecuaciones (hemos de reservar este problema para otro estudio). Asimismo, según hemos aludido más arriba, será necesario tener en cuenta una tercera fase: el fluido intercelular. Pero la conclusión verdaderamente importante se conserva: el tamaño y forma de las células de todo el órgano, así como sus parámetros puramente físicos (tales como los coeficientes de difusión y las permeabilidades) tienen que desempeñar un papel muy importante en la formación de periodicidades en el sistema endocrino. Conclusiones que conducen a diversas sugerencias relativas a experimentos que podrían adquirir gran trascendencia clínica.

Con posterioridad a la presentación de esta comunicación, un estudio ulterior del sistema formado por (19) y (22) ha llevado a las desigualdades que tienen que satisfacer las Λ para que *no* aparezcan periodicidades: hemos hallado que unos valores elevados de Λ_p y de Λ_θ *evitarían* las variaciones periódicas permanentes; ello significa que unos valores más pequeños de los coeficientes de difusión y de las permeabilidades y unos tamaños mayores de las células de las glándulas, juntamente con unas

formas más redondeadas de estas células, serían beneficiosos. En otro lugar publicaremos los pormenores.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha tenido la ayuda de una beca procedente del Dr. Wallace C. and Clara A. Abbot Memorial Fund, de la Universidad de Chicago.

RESUMEN

En una serie de trabajos, DANZIGER y ELMERGREEN han desarrollado una teoría matemática de los fenómenos periódicos en el sistema endocrino que se basa en la no linealidad de ciertos circuitos bioquímicos de realimentación. (Suponían que a tales periodicidades se debían psicosis tales como la catatonía periódica, y se han efectuado aplicaciones clínicas de esta teoría teniendo en cuenta los trabajos de R. GJESSING sobre los efectos de administración de la tiroidina.) Sin embargo, DANZIGER y ELMERGREEN utilizan en su teoría, como primera aproximación, unas ecuaciones de la cinética bioquímica que solamente son válidas para sistemas homogéneos: dicho de otro modo, desdeñan la estructura celular de los órganos endocrinos y los efectos de la difusión y de la permeabilidad sobre la velocidad a que se produzcan las reacciones bioquímicas.

En el presente estudio hemos tomado en consideración tales efectos, si bien todavía en forma sólo aproximada. Esta teoría generalizada hace ver que los diversos parámetros del sistema que determinan el carácter de las periodicidades no dependen solamente de las cuotas correspondientes a las reacciones bioquímicas, sino asimismo de las constantes de difusión de los diversos elementos reaccionantes en los cuerpos de las células.

Asimismo dependen de la permeabilidad de las diversas membranas de los tejidos con respecto a tales cuerpos reaccionantes y —cosa de particular interés— del tamaño y forma de las células que constituyan la glándula endocrina. De modo que si, como indican los testimonios empíricos aportados por DANZIGER y ELMERGREEN, la catatonía periódica refleja ciertas periodicidades del sistema endocrino, de nuestro estudio se siguen varias conclusiones de posible importancia práctica: no solamente apunta esta teoría hacia los posibles efectos de unos fármacos que afectasen la viscosidad del citoplasma o la permeabilidad de las membranas, sino que asimismo hace pensar en la posibilidad de efectos producidos por traumas puramente mecánicos o por tumores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

DANZIGER, L., y ELMERGREEN, G. (1954): Mathematical theory of periodic catatonia. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 16,* 15-21.

DANZIGER, L., y ELMERGREEN, G. (1956): The thyroid-pituitary homeostatic mechanism. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 18,* 1-13.

DANZIGER, L., y ELMERGREEN, G. (1957): Mathematical models of endocrine systems. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 19,* 9-18.

DANZIGER, L., y ELMERGREEN, G. (1958): Mechanism of periodic catatonia. *Confinia Neurologica, 18,* 159-166.

GJESSING, R. (1939): Beiträge zur Kenntniss der Pathophysiologie periodish katatoner Zustände. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 109,* 525-595.

GJESSING, R. (1953): Beiträge zur Somatologie der periodischen Katatonie. *Archiv für Psychiatrie — Zeitschrift für Neurologie, 191,* 191-326.

RAPOPORT, A. (1952): Periodicities in open linear systems with positive steady states. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 14,* 171-183.

RASHEVSKY, N. (1960): *Mathematical Biophysics: Physico-Mathematical Foundations of Biology,* tomo 1.º, 3.ª ed. Nueva York, Dover Publications, Inc.

ROSTON, S. (1959): Mathematical representation of some endocrinological systems. *Bulletin of Mathematical Biophysics, 21,* 271-282.

DISCUSION

WIENER.—Usted habla de unas oscilaciones periódicas; pero ésas no son fisiológicamente típicas. Por lo general, tenemos oscilaciones cuyo margen de frecuencias se sitúa alrededor de un período determinado, y unas oscilaciones periódicas no demasiado netas (las oscilaciones no periódicas se tratan por el método de la autocorrelación). Además ha introducido usted la irregularidad de la forma de las células, cosa que puede mirarse como el tipo de irregularidad que uno se encuentra en los campos estadísticos. Me interesan mucho los problemas físicos, y, lo primero, los campos estadísticos: cuáles son las transformaciones que dejan invariante la estadística (pero no el caso individual) y cómo se consiguen las autocorrelaciones. Estoy completamente seguro de que los métodos de este tipo pueden tener aplicación aquí; dicho de otra forma, se puede introducir la variación de la forma celular por un proceso estocástico espacial, y pasar luego a la dinámica del proceso. Así se puede obtener la autocorrelación y la cuestión de la inestabilidad de las oscilaciones permanentes (que entonces no tienen por qué ser siempre permanentes a una frecuencia). Tengo la sospecha de que cuando empleamos métodos de este género, que no son muy precisos, cabe utilizar instrumentos matemáticos más manejables y nos es posible tratar de un modo más práctico las cuestiones de la oscilación permanente o de la que se extingue.

RASHEVSKI.—Creo que las sugerencias del profesor WIENER son muy valiosas (aunque me gustaría, desde luego, verlas propuestas de una forma algo más específica). Siempre hay distintas maneras de atacar un problema, y normalmente es deseable enfocar cualquier problema desde distintos ángulos. Como ya he indicado, lo único que he hecho ha sido generalizar el trabajo de DANZIGER y ELMERGREEN para tener en cuenta la inhomogeneidad del sistema, su naturaleza de *compartimentado;* pero incluso esto lo he hecho solamente en una primera aproximación. Las investigaciones futuras nos dirán cuál de los distintos enfoques posibles es más útil; y me siento inclinado a aventurar la opinión de que el sugerido por el profesor WIENER y el que he empleado yo resultarán ser equivalentes. Para ciertos aspectos del problema, un modo de ataque puede revelarse como más útil, y para otros puede ser preferible el otro.

WIENER.—Me parece que se puede uno apoyar directamente en el tipo de trabajo que he estado realizando a partir de la autocorrelación hasta llegar al espectro: en él el sistema tiene que considerarse como un campo, o cierto número de campos, con una vibración estadística; y hay que mirar el estado estacionario de semejante sistema como una totalidad estadística.

Estoy trabajando ahora en unos problemas parecidos en la teoría de los gases; aquí utilizo métodos estadísticos que dependen de funciones sobre el espacio. Tengo la impresión de que en este caso tiene muchas ventajes emplearlos, y que probablemente simplificarán mucho: me parece que gran parte de las complicaciones se desvanecen si el punto de vista es completamente estadístico desde el principio.

RASHEVSKI.—He de decir una vez más que estoy de acuerdo con el profesor WIENER en general: la importancia de los enfoques estocásticos de tales problemas es evidente. Sin embargo, en algunos casos las células individuales pueden presentar ciertas constancias, y en ellos puede estar justificado el enfoque que he expuesto hoy, más sencillo.

WIENER.—Actualmente estoy trabajando con análogos de gases, en los que se tienen moléculas específicas del gas: en un *análogo* así se manejan continuos, y se puede llegar a aproximaciones. El fenómeno de las moléculas específicas forma cierto invariante de la frecuencia espacial, pero estas frecuencias están limitadas. Se puede construir una teoría más utilizable que la teoría clásica de los gases y con la que se prediga una aproximación bastante buena de los plasmas, en los que se tienen fuerzas a gran distancia; y, para mí, esto apunta enérgicamente a que el método de la *falsación estadística* podría ser un modo de ataque de tales campos. Por ejemplo, en el campo de las glándulas endocrinas no se tomaría en consideración

la forma de la célula individual, sino las correlaciones con distancias, etc.; creo que los métodos de este género tienen verdaderas posibilidades en muchos casos, porque se introduce en seguida el elemento estadístico; y de este modo se pueden evitar algunas ecuaciones enormemente complicadas.

RASHEVSKI.—De buena gana aventuraría una predicción, profesor WIENER: la de que en el futuro se verá que su enfoque y el mío convergen.

SCHOUTEN.—¿Qué relación hay entre las ecuaciones que usted emplea y la ecuación no lineal de VAN DER POL para representar las oscilaciones de relajación?

RASHEVSKI.—VAN DER POL ha sido uno de los primeros que han estudiado las posibles aplicaciones biológicas de las oscilaciones de relajación; y en la medida en que en nuestros días la expresión *oscilación de relajación* denota todos los tipos de oscilaciones no lineales, este trabajo guarda relación con el de VAN DER POL. También se han estudiado otros varios casos de oscilaciones de relajación en biología; por ejemplo, el profesor THORSTEN TEORELL, de Uppsala, está trabajando actualmente sobre estas oscilaciones en los fenómenos de las membranas.

MERCER.—Quisiera criticar el tratamiento de la cuestión por el doctor RASHEVSKI basándome en que ha despreciado los cambios más importantes que se producen en las células de los órganos enlazados mediante hormonas: cuando dos órganos están enlazados por hormonas que se transportan de uno a otro, la hormona del órgano A hace que las células del órgano B se diferencien, e incluso aumenten en número, y que empiecen así a formar su hormona (lo cual influye en el órgano A). El fenómeno periódico surge probablemente como resultado del retraso temporal que se necesita para producir la segunda hormona, esto es, para que las células se diferencien: estos cambios son mucho más fundamentales que ninguno de los atendidos en el tratamiento del asunto por el doctor RASHEVSKI.

RASHEVSKI.—ROBERT ROSEN ha estudiado recientemente, desde un punto de vista topológico, los efectos del retraso temporal como *posibles* causas de las oscilaciones biológicas; y yo también he estudiado hace poco (aunque no lo he publicado aún) los posibles efectos de las demoras temporales en el sistema endocrino. Sin embargo, no creo que los efectos de la diferenciación celular puedan desempeñar un papel esencial en los fenómenos de que me he ocupado hoy: en un organismo adulto no observamos ni diferenciación ni proliferación, al menos no dentro de los cortos períodos que intervienen en la catatonía periódica. No cabe duda de que tales efectos desempeñan un papel en el desarrollo del embrión; pero se trata de algo que cae fuera del alcance del presente estudio.

WIENER.—Me gustaría decir ahora que me parece que lo que ha sacado usted a luz es importantísimo, a saber: la plasticidad de los órganos mismos; y creo que para las oscilaciones con tiempos más largos, lo que ha dicho tiene grandes repercusiones.

VAN SOEST.—Estoy completamente de acuerdo con los señores que acaban de hablar en que es evidente que hay que introducir el tiempo en las ecuaciones, e integrarlo en ellas. No cabe duda de que habrá que introducir una autocorrelación, o algún otro sistema memorizador, para resolver las características más destacadas de estos problemas.

RASHEVSKI.—El tiempo entra explícitamente en nuestras ecuaciones. Yo diría que lo que es necesario introducir es, para fenómenos a largo plazo, algún tipo de efectos de histéresis (que hemos estudiado en varias publicaciones sobre otros campos de la biología matemática). Una generalización ulterior de nuestro estudio llevaría, sin duda alguna, a introducir algunos efectos de esta índole; y la memoria, como hemos tratado en otro lugar, es un caso muy especial de histéresis.

La falta de importancia del "sistema nervioso"

Por O. D. WELLS

Parece un poquito irreverente llegar a un grupo de neurofisiólogos y hablar acerca de la poca importancia del sistema nervioso: es algo como estudiar la estructura animal y hablar de la falta de importancia del corazón. Sin embargo, el propósito de esta comunicación es solamente el de intentar definir si la importancia del sistema nervioso llega hasta el punto con que se la acentúa actualmente.

El razonamiento es como sigue. En el aspecto espacial, las *especies* que son miembros supervivientes están fuertemente contrapesadas en número por las que no poseen sistema nervioso alguno reconocible: pues en éstos se incluirían todos los unicelulares (protozoos, amebas, etc.), bacterias, virus, etc., muchos pluricelulares y todo el mundo vegetal. Si tratamos los órganos del cuerpo como organismos casi independientes, la sangre, el hígado, el corazón, etc., no tienen sistema nervioso propio. Y si trazamos la línea de demarcación de la constitución del sistema nervioso central en el estadio, digamos, del gusano de tierra, tenemos una preponderancia de especies aún mayor. Temporalmente, si aceptamos como buena la estimación del desarrollo evolutivo en unos dos a cuatro billones de años, la formación del tipo de red nerviosa proviene sólo de hace como medio billón de años, y la del sistema nervioso central se remonta únicamente a ciento cincuenta millones de años, digamos.

El argumento siguiente consiste en que, excepto en lo que se refiere a velocidad de transmisión, las funciones del sistema nervioso son ya inherentes [a los seres vivos], incluso en los unicelulares (en los que los gradientes metabólicos, las diferencias de fase, la permeabilidad diferencial, etcétera, sirven como precursores de un sistema nervioso), sin que haya ninguna discontinuidad marcada. La presencia en todos los animales de un sistema de transmisión química a base de los productos de salida de glándulas con conductos o sin ellos, de activadores químicos en la sangre (como la secretina) y la producción de macromoléculas por otras macromoléculas (como los anticuerpos por la globulina gamma, o las proteínas por el ADN-ARN) son claros ejemplos de que existen otros muchos canales de transmisión aparte del sistema nervioso.

Otro argumento más apunta que un antecedente del sistema nervioso

central ha sido un sistema autónomo regido por el medio interno, y lleva a la conclusión de que el marco de referencia de un medio exterior común ha salido a luz únicamente mediante el desarrollo de los receptores a distancia: un sistema nervioso central y un lenguaje —el cual levanta un mapa en correspondencia con el medio [*maps the environment*], y tiene que levantar el correspondiente [*must map*] al medio "interior" como proyección "exterior".

Nuestra hipótesis es que el antídoto contra la acentuación excesiva del sistema nervioso central es descender bien abajo en la escala evolutiva y, olvidados por el momento de las propiedades emergentes, inventar una descripción de cómo pueda interpretarse el comportamiento al nivel de los organismos carentes de células nerviosas reconocibles.

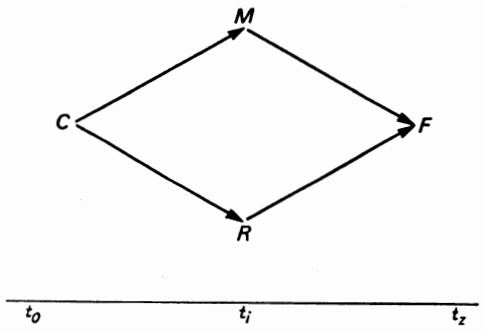
Por empezar con el llamado principio, tenemos el problema del enlace de las moléculas "pequeñas" para constituir otras grandes, las cuales tienen la facutad de formar réplicas de sí mismas. Pero al hacerse éstas mayores, la "forma" parece convertirse en algo más importante que el carácter específico de los grupos particulares que contengan; dicho de otro modo, al aumentar el tamaño, y con tal de que se conserve la forma, algunos grupos pueden sustituirse por otros sin que se altere la función global. Como PENROSE (1960) ha señalado, el módico carácter de la mayoría de los procesos naturales hace pensar que no sería económico disponer de unas plantillas especiales para formar réplicas —según se hace en los procesos de manufactura industrial—, ya que tal formación por las unidades celulares tendría que cuidarse también de sacar réplicas de las plantillas mismas; ello está en conflicto con la hipótesis de WATSON-CRICK de la formación de réplicas del ADN; y otra objeción ulterior a esta hipótesis es la de que no se prevé cómo se efectúa la separación: si decimos que tales polímeros contienen, de acuerdo con su tamaño, una cantidad de información especificada, y que, por consiguiente, se los puede poner en correspondencia biunívoca con los números cardinales, es necesario describir algún mecanismo por el cual la formación de réplicas limite tal tamaño. Este mecanismo formador de réplicas por alineación o contacto podría entrañar, por ejemplo, que un nucleótido de la cadena antigua tuviese una reacción hacia atrás con el nucleótido anterior de la cadena nueva (o alineada); entonces, el inexistente nucleótido n-más-uno de la cadena antigua no podría entrar en reacción con el nucleótido anterior de la nueva cadena, con lo que se produciría una separación, y acaso un desprendimiento de la totalidad de esta última. Por otra parte, debido a tal reacción hacia atrás, la alineación en forma de hélice sería la configuración más probable, y determinaría el giro a izquierdas o a derechas de la [nueva] hélice; con lo que no haría falta plantilla alguna si suponemos que las cadenas son anfóteras (como ocurre con las proteínas); dicho de otro modo, constituirían su propia plantilla, y las plantillas especiales serían superfluas.

Pasando más allá de la etapa molecular, consideremos la "equifinalidad", la "teoría del estado estacionario" y la "correlación directiva" de SOMMERHOFF (1950, 1961 y 1962).

La equifinalidad, o consecución del mismo estado final partiendo de estados diversos, se nos hace presente en muchos experimentos sobre interferencia con la morfogénesis; y, juntamente con el concepto —de VON BERTALANFFY (1952) y otros autores— de sistema abierto, se la puede explicar perfectamente por descripción de un estado estacionario. Tendríamos un ejemplo en las limitaciones del crecimiento, que se deben a un equilibrio entre un anabolismo regido por una superficie y un catabolismo regido por un volumen, de modo que, cualquiera que sea el tamaño de partida de un tipo particular de organismo, se llega en el crecimiento al mismo tamaño, en semejantes sistemas abiertos, el proceso determinante sería un equilibrio metabólico).

Con la "correlación directiva" de SOMMERHOFF nos tropezamos con algo verdaderamente bastante difícil. En el esquema de este autor que hemos dibujado más abajo se intenta hacer ver que, según puede demostrarse, muchas de las características de los seres vivos son propiedades de los sistemas físicos; cosa que consigue ampliando el modo de consideración para que entre explícitamente el tiempo, e insistiendo en que las relaciones involucradas son, por lo menos, tetrádicas, de modo que no se las puede descomponer en conjuntos de relaciones diádicas.

Expliquemos el esquema. Se trata de una representación generalizada de realimentación o retroacción, pero no cabe indicar el bucle de ésta, porque las variables son funciones del tiempo y la realimentación es una propiedad de la relación tetrádica. M y R son variables epistemológi-



C: variable cenética;
M: circunstancias del medio;
R: función de respuesta;
F: finalidad o situación focal:
t: tiempo.

camente independientes, es decir, que son independientes en el instante t_i; ambas son funciones de la variable cenética, C, y F es función de M y de R; o sea, que M y R se compensan mutuamente, con lo que F permanece constante. Así pues, existe una relación de invariancia entre F y el conjunto de relaciones virtuales de la variable cenética, C. (Si pudiéramos

decir que la retroacción estaba en alguna parte, habría que indicar sobre todo las líneas CM y CR, que poseen cierto vago parecido con aferentes.)

El período de retrorreferencia, o sea, $t_i - t_0$, puede ser cortísimo, como en la demora de muchos servomecanismos, o se lo puede ampliar hasta incluir la descripción de fenómenos biológicos tales como "el aprendizaje", "la memoria" y "la adaptación filogenética".

La utilidad de este esquema no es evidente a primera vista, pero podemos exponer dos cosas muy importantes.

1) Al abarcar bajo la misma descripción todas las actividades dirigidas hacia una meta o finalidad, ya sean las de los dispositivos mecánicos como los telémetros o las de los organismos, SOMMERHOFF acaba con la idea de que la organización vital difiera de los sistemas de propiedades físicas, y llega hasta el fondo de tal organización al definir lo que le hace ser distinta de otros tipos de organización parecidos, tales como los sistemas que buscan el equilibrio y algunos de regimiento por realimentación: la diferencia principal es que en estos últimos las variables intermedias, M y R, dependen del tiempo t_i.

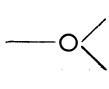
2) La segunda parte reside en la insistencia en que los enunciados diádicos corrientes, por ejemplo, "M está adaptado a B", carecen de eficacia [*are ineffective*], pues dejan de lado el período de retrorreferencia y la variable C: la relación es tetrádica, y no se la puede tratar como diádica.

Muchas personas disputarán a este respecto, y dirán, como WIENER ha demostrado, que la notación binaria es la más económica para las computadoras, que el peso de la autoridad de Aristóteles y su empleo del pensar diádico (tal como en "blanco o negro", el tercio excluso, etc.) han demostrado su eficacia durante muchos siglos, y que las relaciones superiores pueden manejarse mediante funciones de funciones, o con lógicas polivalentes.

No estamos de acuerdo. Necesitamos apremiantemente un verdadero cálculo de relaciones múltiples, que empiece con las triádicas. CHARLES PEIRCE, a mitad del siglo pasado, fue el primero que lo vio, pero todavía no se ha descubierto semejante cálculo. Y creemos que hasta que no se señale explícitamente y se le dé una amplia publicidad a tal necesidad no se inventará dicho cálculo relacional múltiple.

Para representar las relaciones diádicas tenemos la simple línea:

En el caso triádico se necesitaría una línea triple:



que permitiría unas posibilidades de enlace gigantescamente mayores.

A la clase de gente que dice: "Tenemos que continuar el trabajo: los hallazgos de la ciencia hacen retroceder continuamente las fronteras del conocimiento", les contestaríamos que, en vez de continuar el trabajo, sería mejor detenerse un poco y examinar qué trabajo es el que estamos continuando; y si subrayamos lo que no se ha conseguido, frente a lo que sí, podríamos responder que es casi degradante que, siendo seres humanos, vivamos nuestras vidas y nos muramos sin tener ni siquiera un vislumbre de por qué es todo ello, exactamente lo mismo que tampoco el gato que en la casa está echado junto al receptor de televisión sabe nada de su funcionamiento.

Si miramos "cómo son las cosas", según dice BRIDGMAN (1959) —y cita la obvia dicotomía entre los múltiples mundos privados de la sensación individual y el mundo público, con la unidad que se le supone—, existen tantas anomalías que para hacer una descripción pertinente [*competent*] sería necesario empezar casi de cero e idear un nuevo enfoque que las incluyera y explicara. Por ejemplo, ¿qué relación hay entre el estímulo llamado "distal", o su imagen en la retina, y su representación en el campo de visión? ¿Podemos suponer otra cosa sino que la parte alta de la habitación, digamos, se reconoce como tal "parte alta" porque las células de la parte baja de la retina tienen su propia vida y reconocen el ser la parte alta de la habitación de la misma manera que las células del tacto de la pierna, cuando se las estimula, reconocen que aquello es parte de la pierna? De aquí se inferiría una capacidad diferenciadora en todo receptor, o, como mínimo, una rejilla de receptores. Esto no lo tiene en cuenta en absoluto la teoría actual, a menos que se suponga una matriz sensitiva hipotética que admitiera en sí la información y la proyectase luego otra vez hacia afuera, sobre la pared de la habitación o la parte de la pierna que se hubiese estimulado (lo cual es literalmente forzadísimo; y hasta ahora no se ha perseguido ningún mecanismo de esta índole).

Sin embargo, las imágenes mentales podrían explicarse si se descubriera una inervación eferente excitatoria de los receptores sensoriales. Existen algunas pruebas de tal cosa, según las menciona GEORGE (1961), pero así no se explicarían las fantásticas combinaciones y recombinaciones de semejantes imágenes mentales, según acontece cuando planeamos algo en la imaginación, o con los sueños, como tampoco las incontables transiciones de "la realidad exterior" —como cuando decimos "el lago parece azul"— al "interior" —como cuando decimos "el cuchillo hace daño"—. Tras todo ello parece haber un generador poderosísimo y esencial de fantasía, basado en una falta de dicotomía entre el organismo y el medio. (Tenemos aquí un peligro para la ciencia moderna, ya que la energía de este generador puede montar pruebas casi en favor de cualquier creencia; como decía Richelieu: "Dadme seis líneas de los escritos de la persona más honrada y encontraré en ellas pruebas para colgarla.")

En la Artorga Communication N.° 38 (febrero de 1962) hemos pro-

puesto un conjunto, P, de observadores-partículas [*Particulate*] (inicialmente humanos); describimos el comportamiento de un observador cualquiera de éstos, P_i, como determinado por estados, esto es, tal que el conjunto de variables que represente dicho comportamiento sea una función uniforme sólo del estado anterior y del intervalo temporal particular transcurrido. Tomando dos observadores, P_i y P_j, por ejemplo, añadimos un proceso de observación tal que P_i observe los estados de P_j y éste los de aquél (no nos conciernen ahora la "maquinaria" ni el almacenamiento de tales observaciones: podrían parecerse a la traducción directa e inversa, o a codificar y descodificar). Lo que suponemos es que tales observaciones dan lugar al reconocimiento de semejanzas —o, en el caso más leve, regularidades— en el comportamiento de P_j según lo observe P_i, y viceversa. Las regularidades de P_j observadas por P_i, y las de P_i observadas por P_j, forman un conjunto, y a su intersección lógica (esto es, a las regularidades que ambos tengan en común) le podemos llamar un lenguaje.

Si consideramos ahora N observadores-partículas ($P = 1, 2, \ldots n$), la intersección de las regularidades constituye lo que en la Communication número 38 llamábamos lenguaje (el castellano * corriente) —cosa que introducíamos para hacer ver la historia y desarrollo de un lenguaje—; vamos a suponer ahora que este $L.\ 1$ es un conjunto, y que los enunciados de él sirven de parámetros para el comportamiento del conjunto P (en realidad, tendríamos que llamar a éste P_e, o conjunto existente, para distinguirlo del conjunto P_h, o conjunto histórico del que haya surgido el lenguaje del caso; pero para evitar subíndices vamos a hablar de ahora en adelante del conjunto P, aludiendo al conjunto existente).

Este lenguaje 1 es una gran "máquina de enseñar". Por ello, empleando una ley algebraica de composición externa, podemos decir que, para el observador P_i, $L.\ 1 \times P_i$ se aplica o hace corresponder [*is mapped*] en P_i: colocado en forma tabular, todas las parejas ($L.\ 1$, P_i) se disponen en la fila superior, y todos los estados de P_i en la columna de la izquierda, y las conjunciones de unas y otros proporcionan los estados o resultados de la aplicación o correspondencia [*mapping*].

Suponemos luego que los enunciados de $L.\ 1$ (el castellano corriente), al funcionar como parámetros para los P, parecen tener sentido para éstos (en realidad, debido a su evolución como intersección de las regularidades observadas por los P, los enunciados de tal lenguaje no tienen ningún significado excepto en el contexto de tales regularidades observadas).

Para sacar unos significados de mayor alcance de los enunciados de $L.\ 1$ tenemos que proponer un observador exterior o semi-omnisciente, N, el cual queda por el momento sin definir (pero puede decirse que *el lector* desempeña en $L.\ 1$ el papel de semejante observador). Cabe que no exista

* Naturalmente, el texto original se refiere al inglés, pero es necesario substituirlo, entre otras cosas, para que, como se verá unas líneas más abajo, el lector pueda siempre desempeñar cierto papel con respecto a $L.\ 1$. (N. DEL T.)

una definición invariable de *N*, y entonces sería posible clasificarlo, en cuanto conjunto no acotado y cambiante, dentro de los sistemas cognoscitivos o evolutivos descritos por G. PASK; como tal, podríamos decir que sus elementos formaban su propio lenguaje (cada uno el suyo) y alteraban su marco de referencia, y que tratarían de hacer que tuviesen sentido los enunciados de *L.* 1 valiéndose de un lenguaje *L.* 2 (la teoría de conjuntos de BOURBAKI); y, análogamente a como *L.* 1 se había formado por las observaciones mutuas o regularidades del conjunto P_h, los elementos del conjunto *N*, observando en él mismo unas regularidades, podrían formar un lenguaje, L_a (autolenguaje), en el que este [conjunto] podría "tener sentido" dentro de su propio sistema.

Puede parecer extraño que hasta ahora no hayamos mencionado el "medio". Lo hemos pasado por alto deliberadamente, pues sólo serviría para producir confusiones: aquí nos estamos ocupando de una máquina sobre el papel —siendo *el lector* el observador no-partícula [*Departiculate*], *N*— que trate de hacer que "tenga sentido" el sistema completo de $L.\,1 \times P_i$ y P_i. Y si hay algún sentido, en absoluto, en el que exista un medio, será éste.

Visto desde el ángulo del ángel (o del observador semi-omnisciente), lo que en *L.* 1 se llama "medio" es solamente otro lenguaje, que ha desempeñado un papel en la evolución de *L.* 1 efectuada por los P_h: y, en este sentido, puede llamarse lenguaje a todos los "objetos", los estímulos visuales y auditivos (tales como los programas de televisión), todas las destrezas, etc. Puede haber lenguajes —ya sean de neurosis, conspiratorios o de cultura— de los que no existan documentos; hay lenguajes bipersonales, y también pluripersonales. Pero ahora vamos tras de lo que podrían llamarse lenguajes monopersonales; de modo que, como especulación o experimento mental, vamos a excluir todo "medio común" como marco de referencia (excepto en cuanto que haya desempeñado un papel en la evolución de *L.* 1, el castellano corriente; y a este respecto, desde luego, no aparece nunca explícitamente, sino sólo a través de los enunciados que se hagan en *L.* 1).

Estamos tratando, pues (y sin tener en cuenta la meta de la compatibilidad [*consistency*]), de inventar un cálculo en el que puedan hacerse enunciados que tengan algún significado para *N* (que será *el lector*), posiblemente gracias a emplear *L.* 2 (la teoría de conjuntos bourbakiana) como *meta*lenguaje para la descripción de *L.* 1, y, evidentemente, empleando *L.* 1 como *meta*lenguaje para describir *N*. Por consiguiente, *N* es una envoltura dentro de la cual el lector puede meter sus propios significados; constituye, por tanto, algo análogo a un cálculo proposicional, en el que se puede dar valores a las variables y "significado" a los enunciados.

Podemos considerar que *N* posee un tamaño y una complejidad sin límites. Nuestras tentativas de entrar en interacción con él pueden o no dar lugar a regularidades que nos ayuden a formar un lenguaje en el sen-

tido que venimos aceptando hasta aquí; pero entrar en tal interacción sería construir una serie de modelos, y el único criterio que podemos tener acerca del éxito en la interacción es el de que nos demos cuenta de cierta "realidad" o correspondencia intuitiva entre el modelo concreto que sea y lo que pensemos que es *N* (y en este sentido se trata de algo enteramente dentro del solipsismo). Un ejemplo de semejante modelo podría constituirlo la *Psicología topológica* de LEWIN —aun cuando este modelo particular, con todos sus intentos de [definir] un espacio de sentimientos y unos vectores de recompensas y de castigos, está muy menoscabado por falta de un aparato matemático descriptivo apropiado.

Muchos modelos de red nerviosa que se apoyan en el supuesto (en *L.* 1) de que un medio exterior "común" es el único marco de referencia posible exigen una maquinaria que empareje semejante medio con la red nerviosa; creemos que se trata de algo creado artificialmente, que se debe a aquel supuesto. Análogamente, existe un "lenguaje" de los experimentos científicos, y los protocolos de estos experimentos únicamente necesitan que se empleen ciertos métodos perfectamente definidos, a los que podemos calificar asimismo en *L.* 1 de cosas artificiales, debidas a los supuestos que entran en ellos. Por ejemplo, si elegimos un sistema en el que se "enseñe" a un conjunto de palomas a picotear una figura iluminada, y si, sin mediar ningún refuerzo, la picotean inmediatamente dieciocho meses más tarde, podríamos decir que habíamos demostrado de un modo evidente el aprendizaje y la memoria; no obstante lo cual, si incluimos la técnica experimental como "parte" de la descripción, podríamos también decir que no se había almacenado nada en la memoria, ya que la presentación de la figura iluminada había sido necesaria para recordar, y que sería una argucia negar que en los ejemplares de esta figura estaba almacenado el elemento memorizado. Y asimismo podríamos decir que no se había producido aprendizaje alguno, ya que la "finalidad" de conseguir grano era una propiedad objetiva del sistema formado por la combinación de paloma y dispositivo experimental, finalidad que se lograría en semejante combinación sin que se haya necesariamente de producir un cambio en la paloma (uno puede enviar un paquete a su destino por avión, por ferrocarril o por mar sin que se produzca ningún cambio esencial en su contenido).

Hay otros muchos modelos de los que puede considerarse que objetivizan *N* en una serie cambiante. Y su utilidad consistiría en que por primera vez proporcionarían a *N* (al lector) un modelo objetivo de cómo es, de modo que el lector podría entenderse y comunicarse consigo mismo, y, en este sentido, ser su propio psiquiatra.

El modelo en que estamos pensando en este momento es cierto tipo de generador de fantasía mencionado en anteriores comunicaciones de Artorga. En este modelo suponemos un generador de fantasía no localizado, en el que, valiéndose de *L.* 1, toda la "experiencia" se aplica o hace

corresponder [*is mapped*] en fantasía, y ésta se aplica o hace corresponder continuamente en "experiencia"; así, pues, en *L.* 1 no existe diferencia *esencial* entre estar dormido y estar despierto. Además, si aceptamos el supuesto de que el "medio común" es algo artificial de *L.* 1, nos encontramos con una fuente de una enorme variedad. En una conferencia dada en el otoño de 1961 ante el British Philosophy of Science Group, THORPE afirmaba que no le parecía existir la suficiente variedad genética para apoyar la bien documentada tesis de que el canto de cierto tipo de pájaro cantor no es aprendido, sino que está determinado genéticamente; pero en el modelo que proponemos aquí, el "mirar los genes" forma parte de un sistema mayor, que posee la necesaria variedad: en cierto sentido de *L.* 1 podemos decir que si miramos unos genes, o una diapositiva del cerebelo con una tinción determinada, o una vista del foro de Roma, estamos sólo mirando nuestro propio cerebro. En este sentido existe una enorme variedad inherente a un juego de pelota con dos jugadores, dos palas y una pelota; y todavía hay más variedad, desde el punto de vista del modelo del generador de fantasía, en un lienzo desnudo, un pincel y una paleta.

RESUMEN

Se ha subrayado excesivamente el sistema nervioso, posiblemente porque el cerebro parece ser el único órgano con la estructura suficiente para ser el depositario de los complejos almacenes y centros que se precisan para dar razón de las correspondientes complejidades del comportamiento; pero creemos que se da cuenta mejor de tales almacenes y centros suponiendo una combinación de medio y organismo. Proponemos que se emplee un super-observador —de tipo *elemento opaco*— vinculado a un lenguaje bien definido (tal como la teoría de conjuntos bourbakiana), en el que pueda estudiarse nuestro lenguaje ordinario, el "castellano corriente", al que llamamos lenguaje 1 —el cual, a su vez, se aplicaría o haría corresponder en un conjunto de observadores partículas, P ($L.1 \times P_i$ en P_i).

O acaso fuese fructífero considerar la relación entre antígeno y anticuerpo: las 10.000 cosas que, según apunta BURNET (1956), "no sabe" la globulina gamma —o, dicho de otro modo, frente a las que ha aprendido a reaccionar y a reconocer como "no ella"—. La descripción de tal actividad nos podría conducir, por lo menos, a la posible conclusión de que la actividad "en correlación directiva" de semejantes macromoléculas sería comparable no sólo a lo que suele llamarse "sensación", sino a la sensación "de ver" (como, por ejemplo, las imágenes mentales cuando tenemos los ojos cerrados). Y ya sean o no semejantes estas imágenes a una "actividad en vacío", en

el sentido de la escuela de LORENZ-TINBERGEN, existe una analogía, como RUSSELL (1961) señala, entre la "improntación" o "acuñamiento" de los animales a poco de nacer y el implante experimental de la tolerancia (normalmente en el embrión).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BRIDGMAN, P. W. (1959): *The Way Things are.* Londres, Harvard University Press.

BURNET, SIR MACFARLANE (1956): *Enzyme, Antigen and Virus.* Londres, Cambridge University Press.

GEORGE, F. H. (1961): *The Brain as a Computer.* Londres, Nueva York, Pergamon Press.

PENROSE, L. S. (1960): *Development in the Theory of Self Replication.* Londres, Penguin Books *New Biology,* núm. 31.

RUSSELL, W. M. S. (1961): *Evolutionary Concepts in Behavioral Science.* Ann Arbor, Mich., *General Systems Year Book,* núm. VI.

SOMMERHOFF, G. (1950): *Analytical Biology.* Londres, Oxford University Press.

SOMMERHOFF, G. (1961): The anatomy of vital organisation. *Artorga Communication, 36.*

SOMMERHOFF, G. (1962): *The Abstract Characteristics of Living Systems.* Edición privada.

VON BERTALANFFY, L. (1952): *Problems of Life.* Londres, Watts and Co.

Epílogo

Por N. WIENER

Tengo la intención de ocuparme de un problema específico de la medicina cibernética, en vez de entrar en una discusión general de la cibernética del sistema nervioso, tremendo problema de que han tratado otros muchos autores en este volumen.

En realidad, hasta cierto punto voy a dar por supuesto el cerebro en todo lo que voy a debatir: pues quiero ocuparme de la manera en que entran impulsos en el cerebro y salen de él hacia la acción, el bucle de realimentación que va a parar a la sensación, las respuestas motoras, cinestésicas y de otra índole al movimiento como sensación, y así dando vueltas una y otra vez. Existen muchos métodos de investigar estas cosas: se trata de un problema de reflejos condicionados, y se puede lograr mucho mediante observaciones o experimentando con animales; sin embargo, hay algunos instrumentos muy importantes en los que no solemos pensar como algo que esté en general a nuestra disposición para este problema, y que, según me parece, pueden contribuir a que lo entendamos de un modo más útil y pormenorizado.

Hace varios años que se me ocurrió la idea de que el problema de la prótesis y la recuperación (el de lograr que los amputados puedan funcionar de nuevo y el de que la gente que ha perdido un sentido corporal o varios pueda hacer lo mismo) no sólo era interesante como tarea humanitaria: también lo es como método de exploración, en el que nos enfrentamos directamente con la necesidad de no sólo realizar meramente ejercicios sencillos y elementales con el bucle nerviomuscular sensorial reflejo, sino con la de hacer que un aparato estropeado funcione otra vez lo más posible en forma normal. Sería ideal si pudiésemos coger el nervio cortado, colocar un electrodo en el extremo de cada fibra, introducir impulsos desde el exterior, obtener impulsos motores y restaurar de tal forma el aparato estropeado. No pretendo decir que no se llegará a hacer, ni que estamos muy lejos de conseguirlo de un modo estable, viable; pero el tejido nervioso es muy delicado, y el tejido nervioso dañado lo es casi siempre irreparablemente. Sin embargo, hay otras maneras de recomponer los arcos reflejos lesionados (en una mano amputada, digamos).

La mayoría de los músculos que mueven la mano —excepto unos

pocos que la extienden, o que la contraen lateralmente, y cuya importancia es relativamente pequeña— se encuentran en el antebrazo. Un músculo amputado sigue teniendo toda su inervación, e incluso todo su complemento de órganos sensoriales cinestésicos; no obstante lo cual, no puede actuar directamente. Hace varios años tuve la idea de coger un músculo amputado, recoger su potencial de acción, amplificarlo y lograr así un movimiento; y quise que se sacase algún partido a tal idea, pero era muy difícil. Mientras tanto, los ingleses estaban trabajando sobre la misma idea; y recientemente los rusos la han continuado con un éxito considerable (según creo, admiten que es la misma idea que había introducido yo).

Hace un año, el verano pasado, asistí a una reunión en Moscú en la que se discutía una mano artificial que habían preparado de ese modo. Tienen dos electrodos, uno para los músculos extensores y otro para los flexores, que están unos y otros en el antebrazo; sacan de ellos los potenciales de acción, los amplifican y mueven con ellos una mano artificial. La energía de los motores proviene de unas baterías que se llevan en un cinturón, y que, según dicen, valen para catorce horas de trabajo sin necesidad de recargarlas. Han logrado verdaderamente mucho en su labor, aunque tengo que admitir que la mano que consiguen mover es una especie de garra: los dedos están separados, pero la finura afectiva no es grande (no se puede sacar mucha finura afectiva de dos electrodos). Y tengo que admitir también que, por más que se den perfecta cuenta de la importancia del problema de recoger otra vez sensaciones de tal miembro amputado o mano artificial, o no lo han resuelto o no han avanzado mucho en su solución.

El otoño pasado tuve la mala suerte de sufrir un accidente: me caí en una escalera y me rompí la cadera y el antebrazo; naturalmente, se me sometió a tratamiento en una clínica y, naturalmente, estuve en contacto con cirujanos ortopédicos. De un modo igualmente natural, no pude evitar hablar con ellos y exponerles mis aficiones, y hablé de esta idea acerca de los miembros amputados; en aquel momento uno de ellos acababa de estar en Rusia, enviado por nuestro Departamento de Estado para averiguar una cosa y sólo una: qué es lo que estaban haciendo los rusos con miembros artificiales. He de admitir que, por la razón que fuese, se le escaparon una buena cantidad de detalles, pero había vuelto con la convicción de que eran capaces de hacer que la gente volviese a trabajar con aquellos miembros artificiales: debido al hecho de que los impulsos nerviosos eran poco más o menos como los normales, era muy fácil aprender a utilizar aquellos miembros, pues se empleaban los mismos músculos, aun cuando su contracción no se utilizaba para tirar de nada, sino como señal.

En la habitación que ocupaba en la clínica empezamos a discutir planes para el futuro, y formamos un equipo de cirujanos ortopédicos, de

neurólogos y de ingenieros para seguir adelante con el problema; y hemos tenido la suerte de conseguir los servicios y la ayuda financiera de la Liberty Mutual Insurance Company, organización que se interesa mucho por los problemas de recuperación.

Al ocuparnos de la prótesis desde este punto de vista nos tropezamos con un montón de problemas nuevos. En una amputación no podemos considerar que una pérdida es completa mientras no haya desaparecido también la señal: en la moderna técnica biológica es algo obvio coger señales débiles y ampliarlas, de modo que una señal del orden de los milivoltios procedente del potencial de acción de un músculo puede mandar (gracias a una batería) un motor de potencia considerable. Pero esto significa mucho más de lo que a primera vista podría parecer: por ejemplo, una de las cosas que nos preocupan en lo que los rusos han hecho (y creo que también les preocupa a los rusos) es que dos electrodos, uno para la flexión y otro para la extensión, no son suficientes para manejar bien un brazo: si queremos hacer la cosa bien, tendríamos que sacar los impulsos por separado de cada músculo, o incluso de cada haz de fibras; lo cual significa, en definitiva, que hay que implantar electrodos. Pero ahora nos topamos con toda clase de cuestiones quirúrgicas. ¿Hay alguna manera de sacar a través de la piel el electrodo que hayamos implantado sin causar daños, sin infección? No es problema fácil, pero el éxito con que se ha conseguido sacar electrodos del cerebro a través del cráneo (digamos, en gatos a los que se les hayan implantado éstos) hace pensar que no es insuperable, y tenemos varias ideas sobre cómo dar con ello. Puede que sea necesario coger una tira de hueso, fijarla debajo de la piel, hacerle un pequeño orificio y utilizarlo para impedir que el alambrito, tan fino, rasgue la piel; algunos de los médicos de nuestro grupo han hecho la excelente sugerencia de que podríamos emplear inducción electrostática o electromagnética a través de la piel (o las dos combinadas, como en la radio) para enviar los mensajes fuera. Mas, en cualquier caso, la multiplicación de los mensajes es una parte esencial de toda prótesis verdaderamente óptima; y si alguna vez una persona va a ser capaz de tocar el piano bien con una mano artificial —lo cual admito que es una meta bastante ambiciosa—, tendrá que ser valiéndose de la implantación de electrodos.

A continuación viene otra de las grandes pérdidas en la amputación de la mano, la sensorial: no se puede hacer de un modo idóneo la realimentación correspondiente a la actuación de la mano. Ahora bien, tenemos varias posibilidades en esto. Empecemos con el sentido de la presión: sería perfectamente posible montar en los dedos artificiales medidores de presión que proporcionasen un impulso eléctrico cuando existiese ésta; y estos impulsos podrían actuar sobre diversos órganos receptores de

la piel, que los transferirían al sistema nervioso. Para evitar el problema de la acomodación, yo propongo aparatos vibratorios, pues la acomodación a la vibración es más pequeña que a la presión ordinaria; pero va a ser, de todos modos, un problema muy difícil. Es perfectamente concebible que encontremos modos de llegar al sistema nervioso más directamente de lo que nos parece posible, pero en la situación actual yo diría que lo mejor es una vibración en la piel, lo cual involucra un montón de detalles; y antes de empezar con todo esto tendremos que estudiar los electromiogramas de los músculos mutilados, de los que todavía se sabe muy poco *, la sensibilidad de la piel a la vibración y la sensibilidad diferencial de distintos órganos. Como pueden ver, es un campo fisiológico tremendo.

Luego viene el sentido cinestésico. Para lograr las salidas más definidas en los electromiogramas de músculos, lo mejor es sacarlos cuando se produce una contracción isométrica, en la que la longitud del músculo no cambia, aun cuando se siguen teniendo contracciones locales; sin embargo, si se hace eso se produce una profunda alteración de las sensaciones, especialmente de las sensaciones cinestésicas que se tienen cuando se efectúa una contracción. El doctor BRAITENBERG me ha indicado que podríamos encontrar una forma de conseguir que el músculo siguiera la contracción del miembro artificial en todo su recorrido, lo mismo que el músculo normal sigue al miembro, de modo que las sensaciones cinestésicas fuesen normales en la mayor medida posible; y le vengo dando vueltas al problema.

Voy a exponer una idea osada (que no sé si funcionará). Supongamos que cogemos un músculo largo y lo denervamos en la parte distal, conservando en funcionamiento normal la parte proximal; entonces los órganos de los sentidos trabajarían normalmente, de acuerdo con la longitud. Ahora podríamos estimular eléctricamente de alguna manera la parte distal en forma correspondiente a la posición del miembro artificial: de esta forma podríamos conservar la tensión de la proximal más o menos en el valor que tendría en la misma posición. No digo que la cosa funcione; lo que quiero es que vean la clase de consideraciones que tenemos que hacer en este trabajo.

Advertirán ustedes que toda esta filosofía de las señales es nueva en materia de prótesis; pero es necesaria en este género de labor protésica (para las amputaciones, el acondicionamiento de los electrodos que se implanten, etc.), que se tiene que realizar quirúrgicamente mirando a las posibilidades del método, y no a los miembros artificiales ya existentes.

Pasemos ahora al asunto de la pierna. Nos metemos aquí en unos pro-

* He encontrado después muchos más trabajos de los que sospechaba.

blemas interesantísimos, que, según creo, son de índole fundamental, de índole cibernética, y se refieren a la marcha. Utilizamos la mano casi exclusivamente para la acción puramente voluntaria, esto es, la acción en la que cada acto se efectúa por separado; hay acciones, en cambio, en las que no ocurre esto. Es evidente que el batería actúa periódicamente en forma que ha de mantenerse en fase, y que el pianista tiene también este tipo de acción, pero no me parece que estemos nada cerca del momento de fabricar manos artificiales para baterías y pianistas; por otra parte, si hacemos piernas artificiales tenemos que hacerlas para gente que ande, y andar es una actividad en la que el final de una acción comienza la siguiente, de modo que no nos encontramos con una acción puramente voluntaria; y esto quiere decir que las tomas para la marcha tienen que ser distintas que las del subir o el bajar un escalón, la de levantarse de una silla, etc., que son acciones verdaderamente voluntarias: tienen que estar configuradas con vistas a un proceso continuo. Se ha visto que cuando se injertan tendones después de una parálisis (para reemplazar un músculo de la pierna que no funcione) es sumamente importante que el tendón se injerte en un músculo que esté más o menos en fase con el acto de la marcha; pues de otro modo la persona, por mucho que sea capaz de hacer en forma voluntaria, hará algo equivocado cuando empiece a andar, y pronto abandonará. Yo propongo una doble toma para la actividad del andar, sacada de la pierna sana: hay que hacer que los extensores de una pierna actúen sobre los flexores de la otra (probablemente con cierta demora); pero esto no basta, porque si lo hiciéramos así la persona no podría dejar de andar; por consiguiente, hay que tener una toma para la acción voluntaria (que no es una complicación muy grande, y que podría tomarse, incluso en una amputación, por encima de ésta, de los músculos del muñón de la pierna amputada). Así pues, nos encontramos con el problema de combinar estas dos tomas. Como ven ustedes. tenemos aquí una hermosa cantidad de problemas cibernéticos, que hacen prácticamente necesario que se estudien con todo detalle cosas que antes podían estudiarse en el laboratorio cuando le pareciera a uno bien. Creo, por lo tanto, que esta labor va a aportar muchas cosas a la cibernética neuromuscular, aun cuando la estamos realizando con una finalidad humanitaria concreta. No hay mejor manera de aprender cómo se construye un reloj que arreglar uno; estamos tratando de arreglar un sistema dañado, y al hacerlo empezamos a darnos cuenta de toda la complicación que tiene.

Puedo decir que en nuestro grupo de investigación hemos visto que todos podemos hablar unos con otros, y que todos podemos usar el mismo lenguaje: no ha habido dificultades entre el grupo de los ingenieros y el fisiológico-quirúrgico en cuanto a hacerse cargo de los problemas.

Y estamos completamente decididos a trabajar de un modo que si sacamos algunas patentes será meramente para ponerlas en buenas manos en punto a la fabricación, no para obtener lucro alguno; quiero decir con esto que estamos decididos del todo a no permitir que nuestro proyecto quede vinculado a finalidad lucrativa alguna (estamos todos de acuerdo en esto, incluyendo la compañía de seguros).

Además, en el proyecto no habrá nadie que no procure comprender tanto el lado médico como el ingenieril; es decir, estamos en la oposición más completa a la actitud de "no necesito saberlo" que domina en la gran mayoría de las industrias, y no admitiremos en nuestro grupo a quien no trate de comprender lo que esté haciendo el de al lado. Al principio pondremos a los ingenieros de observadores del trabajo fisiológico: nuestra primera tarea es la de averiguar con qué impulsos del miembro amputado se cuenta, qué posibilidades hay de implantar electrodos y cuáles de lograr una realimentación mediante vibradores u otras realimentaciones análogas. La primera labor es fisiológica, pero los ingenieros tendrán que trabajar después con aquel material; y, por consiguiente, tendrán que ponerse a ella al principio como aprendices de fisiólogos para saber con toda precisión: *a)* las señales con que tendrán que trabajar, y *b)* qué es con exactitud lo que hay que hacer, es decir, qué es lo que significa una restauración de las funciones: tienen que aprender estas cosas del fisiólogo y del neurólogo. Por otra parte, cuando empiecen el proyecto la situación se invertirá: entonces consideraremos que el fisiólogo y el neurólogo están a disposición de los ingenieros para señalarles diversos fenómenos en los que acaso no hayan pensado al principio y que tengan una importancia decisiva para la función ingenieril.

Creemos que estamos trabajando en un grupo muy integrado, y puedo decir que es un grupo en el que todos nos encontramos muy a gusto y al que me siento orgulloso de pertenecer. Y me parece que este tipo de trabajos va a penetrar cada vez más en la cibernética: que formará parte de la medicina cibernética del futuro, que no ha de consistir meramente en la de laboratorio —el averiguar cosas—, sino también en la del ingeniero, la de reparar cosas. Creo que nunca hubiésemos llegado a saber la base fundamental de la ingeniería eléctrica —o, al menos, no en forma comparable a como lo hemos hecho— si no hubiésemos tenido que construir y reparar aparatos valiéndonos de ella; y me parece que lo mismo es aplicable aquí.

Tengo que admitir que con esto no tocamos algunos de los problemas principales de la cibernética médica, ni siquiera en el campo neuromuscular; estamos dando por supuesto el cerebro. (Al fin y al cabo el cerebro es un aparato mejor que todo lo que podamos hacer para reemplazarlo, y hasta en un sistema periférico lesionado es razonable usar el cerebro lo más posible.)

Tenemos que aprender muchas cosas acerca de la posibilidad de reemplazar las señales de entrada por otras señales de entrada y acerca de los reflejos aprendidos.

En definitiva, esta labor tiene que ir de la mano de lo que yo considero, como ustedes, una labor más profunda, la de la neurofisiología del cerebro mismo. He de admitir que este enfoque es inmediato, sin los profundos y enormes problemas que se encuentran en el otro campo; pero no pienso, por esto, que sea un enfoque desdeñable de la fisiología neuromuscular. Y lo que sugiero es que en toda nuestra labor —no sólo en este campo— la medicina cibernética de la terapéutica vaya de la mano de la de la observación; creo que debemos darnos cuenta de que la terapéutica es un instrumento de observación de la máxima importancia.

Indice de autores*

Adrian, E. D., 174, 175.
Albarde, P., 257.
Alcaraz, M., 160.
Allanson, J. T., 39.
Altman, J. A., 160.
Amassian, V. E., 25.
Ames, A., 157.
Andrew, A. M., 94.
Angyan, A. J., 235.
Ashby, W. R., 38, 89, 94, 95, 98, 207, 208, 236, 252, 294, 297, 298, 299, 304, 311, *313-20*.
Attneave, F., 116.
Austin, G. A., 67.
Autrum, H., 159.
Avakyan, R. V., 160.

Barbizet, J., 257.
Barton, J., 307.
Beer, S., 250, 263, 269.
Bense, M., 115.
Beurle, R. L., 38, 213, 235, 313.
Blair, E. A., 24.
Block, H. D., 38.
Blum, G., 207.
Bok, S. T., 124, 128, 213, 228, 235.
Bonner, J. T., 252.
Braines, S. N., 93, 94, 95, 98.
Braitenberg, V., *213-32*.
Braithwaite, R. B., 268.
Brazier, M. A. B., 159.
Bridgman, P. W., 345.
Broadbent, D. E., 234.
Brock, L. G., 20.
Brown, J., 234.
Bruner, J. S., 67, 121.
Buller, A. J., 24, 33.
Burnet, Sir McFarlane, 394.
Bush, R. R., 234.
Bykov, I., 81, 82.

Caianiello, E. R., 216, 249, 264.
Cameron, S. H., 235.
Carnap, R., 237.
Carreras, M., 160.
Castells, C., 160.
Clark, J., 245, *297-311*.
Clark, W. A., 220, 313.
Clarke, A. D. B., 305.
Clarke, A. M., 305.
Corbett, B. D., 307.
Cowan, J. D., *37-42*, 47.
Cragg, B. G., 38.
Crick, F. H., 342.
Crowder, N. A., 302, 303.

Chambers, W. W., 160.
Chapman, B. L. M., 62, 63, 65, 66, 72.

Dalgarno, G., 104.
Danzinger, L., 325, 328, 329, 333.
Del Castillo, J., 20.
Delay, 175.
Desmedt, J. E., 160, 161.
Durup, 174.

Ectors, 173, 174.
Elkind, 293.
Elmergreen, G., 325, 328, 329, 333.
Erlanger, J., 24, 32.
Estes, W. K., 234.
Eysenck, H. J., 234, 305.

Fanjul, L., 160.
Farley, B. G., 220, 313.
Fatt, P., 20.
Fechner, G. T., 288, 289.
Feigenbaum, E. A., 89.
Fernández-Guardiola, A., 160.
Fessard, A., 174.
Finney, F. J., 26.
Frank, H., *115-36*, 144, 149.
Frishkopf, L. S., 20, 32.

Galambos, R., 159, 160.
Gasser, H., 24.
Gelernter, H., 89, 95.
George, F. H., *59-80*, 235, 345.
Gershuni, G. V., 160.
Gjessing, R. R., 325, 329.
Glaser, R., 301, 304.
Goldman, S., 207, 210.
Goodnow, J. J., 67.
Görke, W., 155.

* Las cifras en cursiva indican las páginas en que se encuentra la colaboración del autor correspondiente en la presente obra.

Goubeau, I., 115.
Greene, P. H., 237.
Grimsdale, R. I., 95.
Grossman, R. G., 20, 24, 32.
Günther, G., 118, 241.
Guzmán-Flores, C., 116.

Hagbarth, K. E., 165.
Hagiwara, S., 20, 24.
Harmon, L. D., 21, 235, 239.
Harvey, 173.
Haseloff, 81.
Hayeck, F. A., 63.
Hebb, D. O., 62, 64, 69, 235.
Hernández-Peón, R., 159, 160, 161.
Heyer, A. W., 63.
Hick, W. E., 292.
Hively, W., 304.
Hobart, 173.
Hofstätter, P. R., 118.
Hönerloh, H. J., 153, 154.
Hovland, 118.
Huant, E., *167-89*.
Hubel, D. H., 158.
Hull, C. L., 234.
Hydén, H., 235, 257.
Hyman, R., 121, 122.

Infantellina, F., 83.
Ivahnenko, A., 235.

Jasper, H. H., 127, 128.
Jones, V. W., 206.

Kappers, C. U. Ariëns, 62, 213.
Karkowski, 107.
Katz, B., 20, 287.
Kazmierczak, H., 155.
Keidel, U. O., 162.
Keidel, W. D., 162.
Kemeney, J. G., 301.
Kerr, D. I. B., 120.
Kilburn, T., 95.
Klaus, G., 133.
Kleene, S. C., 63.
Klein, F., 81.
Komenski, 104.
Kozhevnikov, V. A., 160.
Kraft, H., 153, 154.
Kreitman, N., 305.

Lang, 96.
Lashley, K. S., 38.
Latour, *49-57*.
Lauria, F., 216, 217.
Lee, E., 297.
Leibniz, G. W., 104.
Lettvin, J. Y., 44, 158, 235, 240.
Levitt, M., 160.
Lewis, B. N., 253.
Licklider, J. C. R., 286.
Liddell, E. G. T., 71.
Lindsley, D. B., 159.
Liu, C. N., 160.
Livingston, R. B., 159.
Loefgren, 269.
Loomis, 173.
Luce, R. D., 116.
Lumsdaine, A. A., 301, 304.

MacKay, D. M., 236, 237, 238, 269.
Maruseva, A. M., 160.
Masterman, M., 241.
Matthews, 174, 287.
Matthysse, S. W., 38.
Maturana, H. R., 158, 241.
Mayne, R., 292.
McCarthy, J., 208.
McCulloch, W. S., 38, 39, 44, 158, 235, 238, 240.
Mechelse, K., 160.
Merkel, J., 121.
Miasnikov, A. L., 96.
Miller, G. A., 121.
Milner, P. M., 65, 66, 69.
Minsky, M. L., 237.
Moles, A. A., 115, 126, 210.
Morrissey, J., 305.
Mosteller, F., 234.
Müller, P., 123, 128, *137-56*.
Muroga, S., 39.
Myers, R. E., 159.

Nagel, E., 239.
Napalkov, A. V., *89-101*, 235.
Nayrac, P., *285-95*.
Newell, A., 89, 118.
Nigro, A., *81-7*.

Onesto, N., 216.
Ordnance Corps, 315.
Osgood, C. E., 63.

Papert, D., 235.
Pask, G., 62, *233-83*, 297, 301, 302, 307.
Pauling, L., 37.
Pávlov, I. P., 235.
Paycha, F., 310.
Pecher, C., 19, 20.
Peirce, C. S., 344.
Penfield, W., 71.
Penrose, L. S., 342.
Philipps, R. S., 292.
Phillips, C. G., 71.
Pitts, W., 39, 158, 238.
Poletayv, J. A., 209.
Polonsky, I., 257.
Postman, L., 121.
Pribram, K. H., 64.
Price, W., 67.
Pringle, J. W. S., 249, 255.

Quastler, H., 37.

Radionova, E. A., 160.
Ramón y Cajal, S., 213, 218.
Rapoport, A., 327.
Rashevsky, N., 20, 235, 270, 271, *325-37*.
Rasmussen, T., 71.
Rheinberger, 174.
Rohracher, H., 116, 118.
Roldán, E., 160.
Rosen, R., 245, 249, 272, 279, 339.
Rosenblatt, F., 235.
Rosenblith, W. A., 20.
Roston, W. A., 327.
Roy, A. E., 39.
Rupert, A., 160.
Russell, W. M. S., 350.

Sainsbury, P., 305.
Sauvan, J. L., *191-203*.
Schadé, J. P., *9-18*.
Schopenhauer, A., 117, 118.
Schreider, I. A., 98.
Schwartzkopff, J., 127.
Scrivener, J., 305.
Selfridge, O. G., 237.
Semon, 108, 113.
Senders, 286.
Shannon, C. E., 40, 208.
Sheatz, G. C., 159.
Sherrington, C. S., 235.
Sholl, D. A., 213, 228.
Siegal, S., 234.
Simon, H., 118.
Singleton, 286.
Skinner, B. F., 301, 302.
Smith, M. J. A. A., 69, 73.
Snell, J. L., 301.
Sommerhoff, G., 343.
Soroko, V. I., 160.
Sperry, R. W., 162.
Sprague, J. M., 161.
Stagner, 107.
Stanoulov, N., *205-12*.
Stark, L., 20.
Steinbuch, K., 118, 119, 123, 128, 138, 139, 144, 149, 151, 152.
Stellar, E., 161.
Stewart, D. J., 60, 71.
Summer, F. H., 95.
Svechinsky, V. B., 93, 95, 98.

Temperley, H. N. V., 38.
Ten Hoopen, M., *19-34*.
Teorell, T., 339.
Thompson, G. L., 301.
Towera, J., 305.

Uchtomsky, 108.
Uttley, A. M., 39, 40, 63, 213, 235.

Van der Pol, 339.
Verbeek, L. A. M., 39.
Verveen, A. A., *19-34*, 37.
Viernstein, L. J., 20, 24, 32.
Von Bertalanffy, L., 343.
Von Cube, F., 121.
Von Foerster, H. M., 239, 250, *313-20*.
Von Neumann, J., 39, 73, 321.
Vota, U., 229, 230.

Wagner, P. W., 155.
Wailes, R., 297.
Walker, C. C., *313-20*.
Walter, W. Grey, 235.
Watson, J. D., 342.
Weiss, P., 38, 44.
Wells, O. D., *341-51*.
Wiener, N., *9-18*, 39, 91, 106, 118, 133, 184, 244, 249, 286, 344, *351-57*.
Wiesel, T. N., 158.
Wigand, M. E., 162.
Wilkins, J., 104.
Willis, G. D., 235.
Winograd, S., 40, 47.

Young, J. Z., 159.

Zeman, J., *103-114*.
Zopf, G. W., Jr., *157-65*.

Indice de materias

Acetilcolina,
liberación de, 287.
producción de, 257.
Actividad,
cerebral, 90, 91.
y regimiento motor, 71
y regimiento sensorial, 71
convulsiva en la epilepsia compleja, 83
de fondo, 322
humana, la corteza cerebral como asiento de la, 205
mental, formas complejas de la, 89
nerviosa,
formas complejas de la, 89, 100
registro de los procesos de la — en el hombre, 105
Acto elemental, 193.
Adaptación,
estado de — de la formación reticular del tronco cerebral, 189
tiempo de, 175
y aprendizaje, 236, 246, 271
y sistemas eferentes, 166
Administración,
de fármacos, 95
ADN,
hipótesis sobre la multiplicación del, 342
memoria y —, 193
Aferencias,
al nivel cortical, 83
específicas, 85-86
Aleatoriedad,
en las conexiones de autómatas, 47-8
en las regiones corticales, 37
Alegorías,
de procesos mentales, 104
Algoritmos,
cerebro y —, 89-101
de auto-organización, 91
de la actividad cerebral, análisis de los, 91
de los sistemas auto-organizadores, trastorno de, 97
en cuanto procedimiento de computación, 270
trastorno de los, 96, 98
Almacén reciente, 119, 121, 122, 123, 125
Almacenamiento,
de conceptos, 64
de información, la memoria y el, 11, 68
en el cerebro, 71
métodos de, 71
sistemas de, 71
Alucinaciones,
estructura de las, 180
por mescalina, 175
visuales, 179
y EEG, 179
Amartillado,
de una célula o un montaje celular, 65
Aminoácidos,
metabolismo de los, 257
Análisis,
armónico de las ondas cerebrales, 113
de electroencefalogramas, 110
de la estructura de las retículas nerviosas, 94
de las retículas de neuronas ideales, 55
de los algoritmos de la actividad cerebral, 91
del córtex cerebeloso, 17
del comportamiento, 13
frecuencial, 293
funcional de la estructura de la sustancia gris, 215
Análogos,
neurales de la organización nerviosa central, 63
Aparato motor accesorio,
de los sistemas sensoriales, 16
Aplicación,
de estricnina en nervios, 19
de máquinas adaptativas, 310
de uretano en nervios, 19
Aprender,
como forma compleja de la actividad mental, 89
comportamiento del —, modelos del, 234-5
contrastaciones experimentales del, 240
durante el crecimiento, 72
mecanismo del, 234, 249
modelos cibernéticos del, 17

modelos del, 137-56, 233-83
procesos del, 198-9
Aprendizaje,
matriz de, 123-5, 128, 137-56
Árboles,
axonales, 225
dendríticos, 225
Áreas,
corticales,
sensoriales, 76
y aleatoriedad, 37
del lenguaje,
interacción de las —, con estímulos auditivos, 76
interacción de las —, con estímulos visuales, 76
visuales, 76
ARN,
concentración del, 257
memoria y —, 193
modificación del, 258
moléculas del, 257
síntesis del, 257
Asociación,
centros de, 196
Atención,
reacción de, 119
y formación reticular, 161
y sistemas eferentes, 166
Atenuación,
en dendritas, 231
en sinapsis, 231
Atomista,
el enfoque —, en neurología, 43-4
Autómatas,
finitos y el sistema nervioso, 15, 59-80, 238
redundantes, 39
teorías estadísticas de los, 44
Automatización,
de los procesos mentales, 134
Auto-organización,
algoritmos y —, 91
de sistemas y de retículas, 65, 66, 69, 72
Axones,
densidad de —, mielinados, 230
tramos de, 12
velocidad de conducción en, 231

Bel *o* belio, 290
Biocibernética,
definición de la, 9
Bucle gamma, 288

Caer en la cuenta, 237, 238
Campos,
dendríticos, 218
volumen de los, 219
funcionales del cerebro, 210
Canal, 119
Capacidad del cerebro de compensar las perturbaciones, 210
Casi linealidad, 10, 286
Ceguera relativa,
período de, 56-7
Células,
estrelladas y sus dendritas, 226-7
ganglionares de la retina, 165
nerviosas, período refractario de las, 22, 61
piramidales
ramas de los axones de las, 223
tamaño de las, 214, 227
receptoras,
fibras eferentes que terminan en las, 16, 163
Centros,
de asociación, 196
de integración, 195
tramitadores de la información, 123
Cerebelo,
estructura de la capa molecular del, 17, 216
neuronas del, 215
Cerebral(es)
actividad,
análisis de los algoritmos de la, 91-8
de índole eléctrica, 167-89
formas complejas de la, 99, 100
regimiento motor de la, 71
regimiento sensorial de la, 71
análisis armónico de las ondas —, 110, 113
campos,
formación de la excitación de los, 108-9
funcionales, 210
capacidad, 210
conservación — de la información, 206
información — y procesos ondulatorios, 110
procesos fisiológicos —, 106
recepción — de la información, 206
registro encefalográfico de las ondas —, 105
recepción — de la información, 206
retención — de la información, 206
transformación — de la información, 206
transmisión — de la información, 206
tronco,
estado de adaptación de la formación reticular del, 189
Cerebro,
electrónico y computadoras, 86
estimulación eléctrica del, 83
funcionamiento del — humano, 63
matriz de aprendizaje del, 137-156
modelos artificiales matemáticos del, 112, 114

procesos de tramitación de la información en el, 89-101, 103
Cibernética,
definición de la — médica, 9
definición de la bio—, 9
definición de la neuro—, 9
Ciclos de excitabilidad, 21
Cinética,
del sistema endocrino, 325
Circuitos reverberantes,
de la corteza, 222
del sistema nervioso, 71
Citoplasma,
viscosidad del, 336
Clasificación,
efectuada por el sistema sensorial humano, 67
Cóclea,
células ciliares de la, 165
Código,
binario, 140
genético de los tipos de conexión, 68
informativo, 104
Cognición,
modelos cibernéticos de la, 17
Colaterales,
densidad de, 229-30
Columnas dobles,
contradicentes, 143
Combinación de propiedades, 138-41
Comportamiento,
cibernética del — del aprender, 233-84
del aprender, modelos del, 234-6
del organismo humano, 189, 293-4
humano, simulación del, 59, 118, 134
lingüístico, 240
modelos del, 131
motivación del, 92
secuencial de neuronas idealizadas, 15, 57, 290
Computadoras,
digitales de uso general, 60, 77
redundantes, 41
y cerebros electrónicos, 86
Concentración,
de ARN, 257
Condicionamiento,
del sistema nervioso, 11
y formación reticular, 161
Conducción,
atenuada poco a poco en dendritas, 215, 217
velocidad de—,
en axones, 231
en fibras nerviosas, 61
Conexiones,
aumento de — sinápticas, 65
código genético de los distintos tipos de, 68
condicionadas, 138, 141
excitadoras, 215
histología de las, 215
inhibidoras, 65
histología de las, 215
Configuraciones,
de impulsos, 256
de matrices de aprendizaje, 16, 155
periódicas en el EEG, 57
reconocimiento de — como forma compleja de la actividad mental, 89
Consciencia,
contenido de la, 119, 123
grado de, 64
información de la, 105
teoría de la, 118
Construcción de modelos matemáticos de la estructura cortical, 41
Contactos,
aferentes de neuronas, 217
axodendríticos, 218
eferentes de neuronas, 217
Contenido,
de la conciencia, 119, 123
del lenguaje, 103
Contracción isométrica, 354
Conversión en probites, 26
Corteza *o* córtex,
circuitos reverberantes en la, 222
equipotencialidad en zonas limitadas de la, 38
información visual desde la retina a la, 61
Corteza cerebelosa,
estructura de la capa molecular de la, 17, 216
neuronas de la, 215
Corteza cerebral,
esquema de la, 15, 87
como asiento de la actividad intelectual humana, 205
compleja, 12
mecanismo de la, 81
rasgos estructurales de la, 205
solapamientos funcionales en la, 71
Crecimiento,
durante el aprender, 72
Cuerpos celulares,
de las células gliales, 12
de las neuronas, 12

Demora sináptica, 49, 50, 222
Dendritas,
atenuación en las, 231
conducción atenuada poco a poco en las, 215
distribución de las, 220
excitación conducida con atenuación en las, 215
Densidad,
de axones mielinados, 230
de colaterales, 229-30
de excitación, 219

de preparaciones de mielina, 229
de neuronas, 218
Descarga neural,
pautas de la, 32
Desperfectos,
de perceptrones, 38
Determinación de valores máximos, 143
Discriminación, 161, 166
Discurso coherente, 276
Disparo de neuronas,
sincronización del, 71
Distribución,
de dendritas, 220
de terminaciones axonales, 220

Eficacia,
inhibición de la — del estímulo condicionado, 84
Electroencefalografía, 106
ondas α, 172-4, 175, 188
ondas β, 174
Electroencefalogramas,
análisis de los, 110
energía de los, 178
como expresión de la escritura conceptual, 107
como manifestación de la escritura conceptual, 106
influencia de los estímulos auditivos en los, 174
influencia de los estímulos visuales en los, 174
pautas periódicas en los, 57
ritmos α de los — e información sensorial, 16
disminución de amplitud de los, 15, 177, 179
topografía de los, 175
Endocrino, sistema,
aspectos cibernéticos del, 187
autorregulación del, 185-6
cinética del, 325
homéostasis y —, 186-7
interacciones no lineales del, 325
mal funcionamiento del, 325
oscilaciones del, 186, 325
Engramas,
creación de, 199
estructura de los, 196
lógica de los, 192
soporte biológico de los, 193
Entradas sensoriales,
modificadas por el sistema nervioso, 64
Epilepsia,
compleja, actividad convulsiva de la, 83
Equipotencialidad,
de zonas limitadas del córtex, 38
Errores,
de cálculo, 39
sinápticos, 39

Espinas dendríticas,
de las neuronas, 218
Esquema,
de la corteza cerebral, 15, 87
funcional de los procesos del pensar, 205
Estimulación,
auditiva, respuesta cortical a la, 159
de los centros nerviosos, 96
de los nervios, 96
Estímulos,
acústicos, 124
auditivos, 76
combinados, 123-4
condicionados,
acción inhibidora de los, 81
inhibición de la eficacia de los, 84
intensidad de los, 14
mando voluntario sobre — nocivos, 306
olfatorios, 123-4
sonoros, 288
visuales, 76
Estricnina,
aplicación de, 19
tratamiento de nervios con—, 32
Estructura,
celular, teoría matemática de la, 325
cortical, construcción de un modelo matemático de la, 15, 41
de la capa molecular del cerebelo, 17 216
de la sustancia gris, 17
de las retículas nerviosas, análisis de la, 94
del pensamiento y el lenguaje, 103
del sistema nervioso, 68
Evolución de los organismos, 260, 262, 264-5, 267-8, 271-2
Excitabilidad,
ciclo de, 21-2
fluctuaciones de la, 14, 19-34
Excitación
de elementos de conexión, 142
de puntos de la retina, 109
del nervio óptico, 109
densidad de, 219
distribución por la retina de la — al córtex visual, 65
en dendritas conducida con atenuación, 215
factor de ruido en la, 19
formación de la — en campos cerebrales, 108-9
producida por neuronas, 219
umbral de, 19-20, 23, 27-8, 30, 32-3, 34, 56, 108, 294
de neuronas en unidades de, 49
unidad de, 218
visual, 172
Experiencia,
central, 64

efectos de la, 68, 69
motriz y sensorial, 64
Explicación cibernética
de fenómenos patológicos, 15

Falta de importancia,
del sistema nervioso, 341-50
Fatiga neural, 65
Fenómenos patológicos,
explicación cibernética de, 15
Fibra(s)
A del nervio ciático de la rana, 21
córtico-corticales largas, 65
de salida procedentes de neuronas de Purkinje, 215
eferentes,
que terminan en células receptoras, 163
que van a parar a órganos sensoriales, 165
excitadoras largas, 65
inhibidoras locales, 65
nerviosas,
características de "ruido" de las, 33
estimulación de, 19
fluctuaciones de las — periféricas, 39
período de recuperación de las, 22
velocidad de conducción de las, 61
que acaban en células y con terminales
excitadores, 60
inhibidores, 60
Figuras de Chladni, 15, 107, 113
Fluctuaciones,
de las fibras nerviosas periféricas, 37
del potencial de membrana, 33
y potenciales locales, 20
de la excitabilidad neuronal, 14, 19-34
Flujo de información, 122-3
Formación de invariantes, 128-31, 150
Formación reticular,
atención y —, 161
condicionamiento y —, 161
del mesencéfalo, actividad de las neuronas de la, 25
estado de adaptación de la — del tronco cerebral, 189
habituación y —, 161
y regimiento sensorial, 159, 160
y sistema límbico como activadores primarios del sistema conceptual, 74
Fórmula de Fechner, 289-91
Fraccionamiento,
como característica de las retículas neurales, 239
Función,
de propiedades *o* rasgos, 129, 150
de transferencia, 260, 261, 265, 293
gaussiana de distribución, 14, 19

Funcionamiento,
del cerebro humano, 63

Glía,
cuerpos de las células de la, 12
Grado de conexión,
de neuronas, 235
Grafos orientados, 245-6, 272

Habituación, 175
de la respuesta fótica en el quiasma óptico, 160
proceso de, 162
y adaptación, 236
y formación reticular, 161
y sistemas eferentes, 166
Hipertensión,
debida a trauma psíquico durante el desarrollo, 95
Hipófisis,
efecto de los rayos X sobre la, 186
Histología,
de las conexiones excitadoras, 216
de las conexiones inhibidoras, 216
Homéostasis,
de los órganos de los sentidos, 16
en los procesos perceptivos, 161
sensorial, 71, 157-65
Hormonas tirotrópicas,
formación de las, 328
Husos musculares, 24, 165, 217

Ideal, 200
Imágenes,
mentales como proyecciones de la realidad, 104
sonoras de Chladni, 15, 107, 113
Imaginarios,
elementos, 200
Impulsos,
aferentes incondicionados, 87
centrífugos, 85
excitadores, 49
formando configuraciones, 256
inhibidores, 49
las señales de los — nerviosos como portadoras de información, 206, 239
nerviosos, 61
Inducción hipnótica, 305
Inervación,
de los aparatos motores accesorios de los sistemas sensoriales, 163
Información,
almacenamiento de la, 127
y memoria, 11
aportada a la consciencia, 105
canales de transmisión de la, 341
cantidad de, 167
características probabilitarias de la, 105
cerebral y procesos ondulatorios, 190
codificación de la, 122, 127

conceptual, 167-89
conservación, de la, 104
en el cerebro, 206
de los mensajes mentales, 208-9
estructura de la — almacenada en la memoria, 91
facultad de los sistemas sensoriales de reducir la, 158
flujo de, 122-3
fuente de índole motivatoria de la, 74
las señales de los impulsos nerviosos como portadoras de, 206, 239
que pasa de la retina al córtex visual, 61, 63
recepción de la — en el cerebro, 206
registro de la, 104, 113
retención de la — en el cerebro, 206
semántica, 122
sensorial, 167-189
desde el punto de vista psiquiátrico, 16
y ritmos del EEG, 16
tramitación de la, 104, 113
transformación de la — en el cerebro, 113, 206
transmisión de la, 104
en el cerebro, 113, 206
Inhibición,
de la eficacia de los estímulos condicionados, 84
de la formación de tirotropina, 331
recíproca, 306
Integración,
centros de, 195
mecanismo de — de la actividad nerviosa, 38
Interacciones,
a través de membranas, 61
negativas, 177
no lineales en el sistema endocrino, 325
pituitario-tiroideas, 325
Interoceptores,
estimulaciones procedentes de los — como señales patológicas, 99
Intuición, 200
Invención, 200

Latencia, tiempo de, 175
Lenguaje,
contenido del, 103
estructura lógica del, 103
los procesos informativos del — manifestados
en los registros electroencefalográficos, 105
en ondas acústicas del habla, 105
máquinas informatorias que realizan traducciones de un — a otro, 112
operativo, 241, 273
universal de base científica, 112
Ley,
de Bouger-Weber, 290
o fórmula de Fechner, 289-91
Lógica,
de las redes nerviosas, 15
neural, 55

Mal funcionamiento,
del sistema endocrino, 325
del sistema nervioso, central, 325
Mando voluntario,
sobre estímulos nocivos, 306
Máquinas,
adaptativas, 17
aplicaciones de las, 310
en psiquiatría, 297-311
causales, 46
de traducir, 12
teoría de las, 103
informatorias que realizan traducciones, 112
que aprenden, 12
Marco conceptual,
de las retículas neurales, 239
Matemáticas,
del sistema nervioso, 10
Matrices,
de aprendizaje, 123-5, 128, 137-56
binarias, 141, 145-7
clasificación de las, 144-52
fase discente de las, 139, 155
fase facultada de las, 139-40, 155
no binarias, 128-9, 141, 147-50
para procesos de reconocimiento de configuraciones, 16, 130-3, 134
perceptivas, 155
principio de las, 138, 139
propiedades de las, 151-2
de significados, 145-6
Mecanismos,
aumento de la tensión sanguínea y — reguladores, 96
básicos de la memoria, 17
de la corteza cerebral, 81
de los procesos fisiológicos del pensar, 205
de los reflejos condicionados, 15
del aprender, 234, 235
funcionamiento de lo — de regimiento innato, 100
memorizadores, 205, 255, 257
para la integración de la actividad nerviosa, 38
Medio interno
del aprender, 244, 249, 252, 254, 265, 279
Membranas,
despolarización de las, 287
excitación de las, 287
interacciones a través de las, 61
permeabilidad de las, 336

Memoria
a corto plazo, 11, 122
modelo de la, 234
a largo plazo, 11, 122
activa, 191-203
almacenamiento de la información en la, 11
capacidad de la, 191-203
estructura
de la, 183, 203
de la información almacenada en la, 91
modelo cibernético de la, 191-203
construcción de un, 194-5
parametros de la — humana, 17
preconsciente, 119, 123, 124
Mensajes,
información contenida en los — mentales, 208
paso de, 9
transmisión de — a través de sinapsis, 9
Mescalina,
alucinaciones debidas a la, 175
Mielina,
densidad de preparaciones de, 229
estimación cuantitativa de la, 17
Modelos
artificiales matemáticos de la escritura cerebral, 114
cibernéticos
de la cognición, 17
del aprender, 17
conceptuales, 16, 63, 73, 76, 117, 119-22, 134
de la memoria a corto plazo, 234
de las redes nerviosas, 348
de tipo analógico, 61
de tipo digital, 61
del aprender, 233-83
del sistema nervioso central, 39-40, 59-80
electrónicos de neuronas, 21
específicos de organizaciones neurales, 39
matemáticos de la estructura cortical, 15, 41
perceptivos, 16
Moléculas
de ARN, 257, 258
Monitores automáticos, 302, 303
Montajes celulares, 65, 66, 71, 72, 75, 79
Motivación
del comportamiento, 73-6, 92
Movimiento
del ojo, 56-7, 63
Muestreo
de una función de rasgos, 129, 141

Nervio
auditivo,
actividad del, 160
respuesta del — y complejo reticular, 159
experimentos con modelos de, 19-34
óptico y su excitación, 109
Nervios,
cambios bioquímicos de los, 61
cambios eléctricos de los, 61
del sistema nervioso humano, 61
tratamiento con estricnina de los, 32
Neurocibernética,
esquema de la, 9-18
Neuronas
actividad de las — de la formación reticular mesencefálica, 25
auditivas de primer orden, 32
comportamiento secuencial de — idealizadas, 15, 57
conexiones de las, 235
contactos aferentes de las, 217
como elementos constructivos de circuitos, 137
como unidades síncronas, 49-57
cuerpos celulares de las, 12
del núcleo coclear, 25
densidad de, 219
eferentes, 217
inhibición de las, 124
espinas dendríticas de las, 218
excitabilidad de las, 287
excitación producida por, 219
facilitación de, 287
ideales,
análisis de retículas de, 55
del tipo de McCulloch y Pitts, 49
inhibición de las, 287
interconexión de las, 37
fibras de salida procedentes de — de Purkinje, 215
ley de todo o nada de las, 13, 43, 287, 288
memoria y —, 193
modelos electrónicos de —, 21
motoras
axiles, 85
poblaciones de — artificiales, 235
receptoras, 159
retículas
de — adaptativas, 254
de — maleables, 254
formadas por —, 50, 119, 239
sensoriales
primarias, 159
secundarias y de orden superior, 166
umbral de las, 219-20
en unidades de excitación, 49
Nivel
cortical, aferencias al, 83
metabólico mínimo, 254-5
Nodos de Ranvier
aislados, 14
en la fibra A del nervio ciático de la rana, 21

Normalización
de combinaciones de propiedades, 148-9
de vectores perceptivos, 132
Núcleo coclear,
neuronas del, 25

Observación en neurofisiología, 13
Organigrama, 122
Organización
del plexo dendrítico, 12
nerviosa central, análogos neurales de la, 63
neural, modelos específicos de la, 39
Organos
de los sentidos,
fibras eferentes a los, 165-6
homéostasis de los, 16
mensajes de los, 119
propioceptivos, 167
receptores periféricos,
vías eferentes que van a parar a los, 163
Oscilación
del sistema endocrino, 186, 325
modos de, 10

Pautas
de descarga neural, 32
de impulsos, 194
Percepción
de la luz, 173
del calor, 55
del frío, 55
facilitación de la, 177
inhibición de la, 177
modelos de la, 117, 131
paso de sensaciones a —, 109
teorías de la — sensorial, 159
transmisión de las vibraciones de la — por el tejido nervioso, 108
visual,
lagunas de la, 56
umbral de la, 56
Perceptrones, 235
deterioro de —, 38
Pericario, volumen del, 219
Período
de recuperación
de las fibras nerviosas, 22
y fluctuaciones de la excitabilidad, 19
refractario
de las células nerviosas, 22, 61
relativo, 22
Permeabilidad
de las células, 331
de las membranas, 335
Pituitaria,
interacción entre la — y la glándula tiroides, 325
Placa motriz, 287
Plexo dendrítico,
organización del, 12
Población
de neuronas artificiales, 235
Potencial de acción,
en las fibras nerviosas, 19
naturaleza de todo o nada del, 43
principio de todo o nada del, 13
propagación del, 9
Potenciales
de membrana,
fluctuaciones de los, 33
umbrales de los, 20
variaciones de los, 19
eléctricos, relaciones entre los, 71
locales y fluctuaciones, 20
Probabilidad,
características de — e información, 105
de respuesta, 14
función que media entre — e intensidad, 26
relación entre — e intensidad, 28
Probites,
conversión en, 25-6
Problemas
insolventables, 265-6
la solución de — como forma compleja de la actividad mental, 89
Procedimiento de computación,
los algoritmos como —, 270
Proceso(s)
de tinción de Golgi, 12, 13
de tinción de Nissl, 12, 13
fisiológicos en el cerebro, 106
homéostasis y — perceptivos, 161
matriz de aprendizaje para — de reconocimiento de configuraciones, 16, 130-3, 134
mentales,
alegorías de los, 104
automatización de los, 134
ondulatorios e información cerebral, 110
registro de los — de las actividades nerviosas del hombre, 105
teoría de la resonancia de los — psíquicos, 108
teoría matemática de los — de difusión, 325-37
Prolongaciones celulares,
dendríticas, 218
Propagación de los potenciales de acción, 9
Propiedades,
combinación de, 138-41, 142-52, 155
vector de, 141, 149
Psicología informatoria, 16, 115-6
modelos de la, 119-27
y telecomunicación, 115-36
Psicosis periódicas, 325

Purkinje, neuronas de,
fibras de salida de las, 215
ramificaciones dendríticas de las, 225

Quiasma óptico,
habituación característica del, 160
respuesta fótica en el, 160

Ramificaciones,
axonales, 218
dendrítica de células de Purkinje, 225
Rasgos,
espacio de —, 130, 140, 149
estructurales de la corteza cerebral, 205
función de—, 129, 150
Rayos X,
efecto sobre la hipófisis de los, 186
Realimentación,
canal de, 209
compensatoria, 188
descripción mediante la—, 116
discriminatoria, 159
impedida, 180
"Reaprender", 147
Receptores,
auditivos, 169
diferenciación de los, 167
inervación eferente excitadora de los — de los sentidos, 345
visuales, 169
Reclutamiento, 288
como característica del sistema nervioso, 61
Redes nerviosas,
lógicas de las, 15
Redundancia,
cantidad de, 121
en autómatas, 39-40, 41, 47
Reflejo,
de extensión, 288
Reflejos,
condicionados,
formación de cadenas autónomas de, 92
formación de un sistema de, 123-4
inhibición de, 81-7
mecanismos de los, 15, 81-7
sistemas patológicos de, 97
tratamiento de los, 14
modelos de, 117
respuestas por — de los organismos, 91
Regimiento,
motor de actividades cerebrales, 71
sensorial de actividades cerebrales, 71
Registro encefalográfico,
de las ondas cerebrales, 105
y ondas acústicas del habla, 105
Regulación,
de la tensión sanguínea, 97
Reforzamiento,
principio del, 92
teoría del, 75
Relaciones,
entre potenciales eléctricos, 71
Rememorización, 197
Resistencia,
de la piel, cambios de la, 306
sináptica, disminución de la, 65
Resolución de problemas,
como forma compleja de la actividad mental, 89
Respuesta,
compleja,
de la vía auditiva y del sistema reticular, 159
cortical a la estimulación auditiva, 159
fótica en el quiasma óptico, 160
habituación característica de la, 160
probabilidad de, 14
refleja del organismo, 91
"suscitada" media, 49
Retículas,
análisis de — formadas con neuronas ideales, 55
de neuronas adaptativas, 254
de neuronas maleables, 254
formadas por neuronas, 50, 119, 239
lineales secuenciales, 15
nerviosas,
análisis de la estructura de las, 94
teoría de las, 56
neurales,
marco conceptual de las, 239
teoría de las, 103
Retina,
células bipolares de la, 165
células ganglionares de la, 165
distribución de la excitación desde la — al córtex visual, 63
excitación de puntos de la, 109
paso de información desde la — al córtex visual, 61
Retroacción,
canal de, 209
compensatoria, 188
descripción mediante la —, 116
discriminatoria, 159
impedida, 180
Reverberantes, circuitos,
de la corteza, 222
del sistema nervioso, 71
Ruido,
características de — de las fibras nerviosas, 33
factor de — en la excitación, 19

Seguimiento, pruebas de, 291-2
Sensación,
definición de la, 289-90
que pasa a percepción, 109
Sentido cinestésico, 354

Seres humanos,
sistema de motivaciones de los, 73
Servomecanismo condicional, 293
Significados, matriz de 145-6
Simulación del comportamiento humano, 59
Sinapsis,
atenuación en —, 231
distinción morfológica entre las — excitadoras y las inhibidoras, 231
índole
excitadora de las, 216
inhibidora de las, 216
iones en las, 167
transmisión de mensajes a través de, 9
Sincronización de disparo
de neuronas, 71
Síntesis macromolecular,
número de bitios por segundo en la, 22
Sistema(s)
activador primario de los — conceptuales, 74
auto-organizadores, 92, 93, 99, 100
de regimiento, 91, 100
trastorno de los, 97
de almacenamiento de información, 75
de motivaciones de los seres humanos, 73
de transmisión química, 341
eferentes de regimiento, 159-61, 163, 165-6
endocrino,
aspectos cibernéticos del, 186-7
autoestimulación del, 185
homéostasis y —, 186
oscilaciones en el, 186
evolutivos, 250
formación de — patológicos de regimiento, 99
límbico
y sistemas de motivación, 64
y formación reticular, 64
como activadores primarios de los sistemas conceptuales, 74
lineales, 10, 285
olfatorio, 165
patológico de reflejos condicionados, 98
reticular, 64
sensorial,
aparato motor accesorio del, 16
inervación del, 163
capacidad del — de reducir la información, 158
clasificación efectuada por el, 67-68
Sistema nervioso,
almacenamiento de la información en el, 11, 127
características del,
fraccionamiento, 61
reclutamiento, 61
sumación, 61
central,
constitución progresiva del, 341
mal funcionamiento del, 325
modelos del, 39-40
circuitos reverberantes del, 71
codificación de la información en el, 122, 127
conceptual, 15, 59
fisiología del, 77
condicionamiento del, 11
entradas sensoriales al, 64
estructura de, 68
falta de importancia del, 341-50
matemáticas del, 10
matriz de aprendizaje del, 137-56
nervios del — humano, 61
real, 59
y autómatas finitos, 15
y telecomunicación, 115-36
Solapamiento funcional,
en la corteza cerebral, 71
Subjetividad y cibernética, 180-1
Sumación
como característica del sistema nervioso, 61
Sustancia gris,
estructuras de la, 17

Telecomunicación,
y psicología informatoria, 16, 115-36
Tensión sanguínea,
aumento de la — con los mecanismos reguladores, 96
regulación del nivel de la, 97
Teoría de la información,
pensamiento humano y —, 207, 211
psicología y —, 115-36
Teoría matemática
de la estructura celular, 325
de los procesos de difusión, 325
Tinción,
de Golgi, 12, 13
de Nissl, 12, 13
Traducción,
de lenguajes operativos, 237, 243, 244, 248, 278
Tramitación,
de señales,
bitios por segundo por neurona en la, 37
sensorial,
teorías de la, 159
Transferencia de mensajes, 9
Transformadores neurosensoriales, 169
Transmisión,
de la información en el cerebro, 26
canales de, 341
de mensajes a través de sinapsis, 9
nerviosa, 9
sistemas de — química, 341

Tronco encefálico,
estado de adaptación de la formación reticular del, 189

Umbral,
absoluto, 290
de estimulación o excitación, 19-20, 23, 27-8, 30, 32-3, 34, 49, 56, 108, 166, 219-20, 294, 313-20
diferencial, 289
número de, 60
Unidad,
de excitación,
umbral de las neuronas medido por la, 49
síncrona,
la neurona como —, 49-57
Uretano,
aplicación de, 19

Valores máximos,
determinación de, 143
Vector de propiedades, 141, 149
Vías,
aferentes
sensoriales, 159
sinapsis de las, 159, 161
eferentes
a órganos receptores periféricos, 163
Vibración,
de células corticales, 109
transmisión por el tejido nervioso de la —, 108
Viscosidad del citoplasma, 335
Volumen del pericario, 219

Zonas,
corticales
sensoriales, 76
y aleatoriedad, 37
del lenguaje,
interacción de las — con estímulos auditivos, 76
interacción de las — con estímulos visuales, 76
visuales, 76

ESTRUCTURA Y FUNCION

El porvenir actual de la Ciencia

Colección dirigida por ENRIQUE TIERNO GALVAN

Núm. 1. *Quentin Gibson.*—LA LOGICA DE LA INVESTIGACION SOCIAL (3.ª ed.)
" 2. *M. F. Ashley Montagu.*—LA DIRECCION DEL DESARROLLO HUMANO (2.ª ed.)
" 3. *Gustav Bergmann.*—FILOSOFIA DE LA CIENCIA
" 4. *Christian Bay.*—LA ESTRUCTURA DE LA LIBERTAD
" 5. *Ernest Nagel.*—LA LOGICA SIN METAFISICA
" 6. *David Hilbert y Wilhelm Ackermann.*—ELEMENTOS DE LOGICA TEORICA.—(2.ª ed.)
" 7. *Vernon Van Dyke.*—CIENCIA POLITICA: UN ANALISIS FILOSOFICO
" 8. *Karl R. Popper.*—LA LOGICA DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA (2.ª ed.)
" 9. *R. M. Martin.*—VERDAD Y DENOTACION
" 10. *Ernest Gellner.*—PALABRAS Y COSAS
" 11. *C. D. Broad.*—EL PENSAMIENTO CIENTIFICO
" 12. *John Hospers.*—LA CONDUCTA HUMANA
" 13. *Arthur Pap.*—TEORIA ANALITICA DEL CONOCIMIENTO
" 14. *T. C. Schelling.*—LA ESTRATEGIA DEL CONFLICTO
" 15. *Richard B. Braithwaite.*—LA EXPLICACION CIENTIFICA
" 16. *Milic Capek.*—EL IMPACTO FILOSOFICO DE LA FISICA CONTEMPORANEA
" 17. *Ros Ashby.*—PROYECTO PARA UN CEREBRO
" 18. *Hans Reichenbach.*—MODERNA FILOSOFIA DE LA CIENCIA
" 19. *George Polya.*—MATEMATICAS Y RAZONAMIENTO PLAUSIBLE
" 20. *George L. S. Shackle.*—DECISION, ORDEN Y TIEMPO
" 21. *D. M. Armstrong.*—LA PERCEPCION Y EL MUNDO FISICO
" 22. *Ernest Nagel.*—RAZON SOBERANA
" 23. *Max Black.*—MODELOS Y METAFORAS
" 24. *Haskell B. Curry & Robert Feys.*—LOGICA COMBINATORIA
" 25. *Ludwig Wittgenstein.*—LOS CUADERNOS AZUL Y MARRON
" 26. *Abraham Edel.*—EL METODO EN LA TEORIA ETICA
" 27. *Alfred Landé.*—NUEVOS FUDAMENTOS DE LA MECANICA CUANTICA
" 28. *Jean Ladrière.*—LIMITACIONES INTERNAS DE LOS FORMALISMOS

En preparación:

Von Wright.—NORMA Y ACCION: UNA INVESTIGACION LOGICA

Serie de FILOSOFIA Y ENSAYO de EDITORIAL TECNOS

ABELLÁN, José Luis: *Miguel de Unamuno a la luz de la psicología.* Una interpretación de Unamuno desde la psicología individual.—248 págs.

ABELLÁN, José Luis: *Ortega y Gasset en la filosofía española.* Ensayos de apreciación.—184 págs.

DÍAZ, Elías: *Revisión de Unamuno.* Análisis crítico de su pensamiento político.—216 págs.

DOPP, Joseph: *Nociones de lógica formal.*—254 págs.

ENJUTO BERNAL, Jorge: *La filosofía de Alfred North Whitehead.*—336 págs.

FERNÁNDEZ DE CASTILLEJO, J. L.: *Actualidad y participación.* Una filosofía contemporánea.—260 págs.

GARCÍA SAN MIGUEL, Luis: *Notas para una crítica de la razón jurídica.*—256 páginas.

GURMÉNDEZ, Carlos: *Ser para no ser.* Ensayo de una dialéctica subjetiva.—144 págs.

HUGHES, John B.: *José Cadalso y las «Cartas Marruecas».*—112 págs.

NICOL, Eduardo: *El problema de la filosofía hispánica.*—292 págs.

NICOL, Eduardo: *Historicismo y existencialismo.*—432 págs.

RAMA, Carlos M.: *Teoría de la historia.* Introducción a los estudios históricos. (Segunda edición.)—200 págs.

SÁNCHEZ DE LA TORRE, Ángel: *Los griegos y el Derecho natural.*—352 páginas.

SOTELO, Ignacio: *Sartre y la razón dialéctica.*—164 págs.

TIERNO GALVÁN, Enrique: *Acotaciones a la historia de la cultura occidental en la Edad Moderna.*—344 págs.

TIERNO GALVÁN, Enrique: *Razón mecánica y razón dialéctica.*—264 págs.